



TESIS - TE142599

**OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS FILTER
PASIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI RADIAL
MENGUNAKAN *WHALE OPTIMIZATION*
ALGORITHM (WOA)**

ASWIN ROSYADI
2212201005

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS FILTER
PASIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI RADIAL
MENGUNAKAN *WHALE OPTIMIZATION
ALGORITHM* (WOA)**

ASWIN ROSYADI
2212201005

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Aswin Rosyadi
NRP. 2212201005

Tanggal Ujian : 12 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.sc., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP:194907151974121001

2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T. (Pembimbing II)
NIP:196404051990021001

3. Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T. (Penguji)
NIP:197411292000121001

4. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. (Penguji)
NIP:197309271998031004

5. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)
NIP:198109052005011002



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS FILTER PASIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI RADIAL MENGGUNAKAN *WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM* (WOA)**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 12 Mei2017

Aswin Rosyadi

NRP. 2212201005

OPTIMASI PENEMPATAN DAN KAPASITAS FILTERPASIF PADA JARINGAN DISTRIBUSI RADIAL MENGGUNAKAN *WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (WOA)*

Nama mahasiswa : Aswin Rosyadi
NRP : 2212201005
Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Prof. Dr Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

ABSTRAK

Sistem distribusi radial adalah jaringan distribusi yang paling banyak digunakan karena memiliki arsitektur yang sederhana dan juga biaya investasi yang murah. Seiring dengan bertambahnya beban, jaringan distribusi ini rentan dengan beberapa masalah, salah satunya adalah penyebaran harmonisa. Peningkatan distorsi harmonisa dapat menyebabkan berkurangnya umur isolasi karena terjadi peningkatan suhu dan juga dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan. Kerugian yang tidak diinginkan ini dapat menyebabkan rugi-rugi daya serta dapat mempengaruhi profil tegangan pada jaringan.

Pada penelitian ini analisis aliran daya *backward-forward sweep* pada sistem distribusi radial/*radial distribution system (RDS)* serta *harmonic power flow (HPF)* digunakan untuk menunjukkan pengaruh dari penyebaran harmonisa terhadap total rugi-rugi daya. *Whale Optimization Algorithm (WOA)* digunakan untuk mendapatkan ukuran serta posisi/penempatan optimal dari *single tuned* filter pasif untuk mengurangi rugi-rugi daya, menjaga besar tegangan efektif, dan juga menjaga *total harmonic distortion (THD)* dalam batas yang ditentukan. Metodologi yang diusulkan dapat dengan mudah diterapkan pada konfigurasi jaringan distribusi radial yang berbeda. Metodologi yang diusulkan pada penelitian ini divalidasi dengan menerapkannya pada *standard test system*.

Kata kunci: *radial distribution system (RDS)* ;*harmonic load flow (HLF)*;*whale optimization algorithm (WOA)*;

Halaman ini sengaja dikosongkan

OPTIMAL FILTER PLACEMENT AND SIZING IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM USING WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM(WOA)

By : Aswin Rosyadi
Student Identity Number : 2212201005
Supervisor(s) : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Prof. Dr Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

ABSTRACT

Radial Distribution System is the most widely used system for power distribution because it has simple architecture and low investment costs. As a result, due to the addition of the customers some challenges are raised about power system losses, and spread of harmonics . Increases in harmonic distortion will result in additional shorter insulation lifetime, higher temperature and also malfunction. These are undesirable as they cause power losses and also affect the voltage profile.

In this study whale optimization algorithm (WOA) is used to find optimal sizing and placement of passive harmonic filter to reduce power losses and keep the effective harmonic voltage profile and the total harmonic distortion (THD) within prescribed limits. Also, a backward-forward sweep in radial distribution system (RDS) and harmonic load flow (HLF) algorithm is performed to demonstrate the effect of harmonic sources on total power loss. The proposed methodology used can be easily extended to different radial distribution network configurations. The proposed algorithm is validated by applying it on standard test systems.

Key words:radial distribution system (RDS); harmonic load flow (HLF); whale optimization algorithm (WOA);

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah subhanahu wa ta'ala yang senantiasa melimpahkan taufik dan hidayah-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Dan dengan tanpa menghilangkan rasa hormat yang mendalam penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah subhanahu wa ta'ala yang selalu menuntun serta melimpahkan taufik dan hidayah-Nya sehingga tesis serta studi ini dapat terselesaikan. Tidak ada usaha, kekuatan dan upaya selain dengan kehendak Allah subhanahu wa ta'ala.
2. Untuk kedua orang tuaku tercinta, Almarhumah Ibu Mustaidah dan Bapak Asmuni. Dan juga kedua saudaraku tercinta, M. Fasih Ridho dan Esti Lutfikasari, serta seluruh keluarga besar yang selalu mendo'akan serta memberi dukungan baik moral maupun material.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.sc., Ph.D dan Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran telah banyak memberikan saran serta bimbingan bagi penulis.
4. Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T, Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng, Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan saran dan masukan demi kesempurnaan pengerjaan tesis ini.
5. Prof. Dr. Ir. Mochammad Ashari M. Eng, Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng., Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc., Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D., Dr. Ir. Soedibjo, M.MT., Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D., selaku dosen Teknik Sistem Tenaga yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan.

6. Shinfika Alfa'ida, istriku tercinta, yang telah dengan sabar menghadapi “semprotan” dalam proses pengerjaan tesis. Wanita istimewa yang telah banyak berperan dalam memberikan semangat, dukungan, serta do'a kepada penulis.
7. Seluruh teman se-angkatan 2012: Mbak Indri, Bu Ros, Koko, Anisa, Fifi, Happy, Septi, Ony, Wahyu, Bayu dan Mas Totok yang telah membantu pada saat kuliah.
8. Semua teman Lab. Simulasi: Pak Suyanto, Mbak Indri, Mas Umen, dan masih banyak lagi yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
9. Seluruh teman server Dinas Cipta Karya dan Tata Ruang Pemerintah Kota Surabaya: Mbak Ida, Mbak yani, Rensy, Mas David, Yosi, Pak Kumar, Orgas, Mas Y, Yoga, Devina serta seluruh staff yang telah memberikan waktu dan kesempatan bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, 12 Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Kontribusi	4
1.6 Metodologi Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Harmonisa	5
2.1.1 Pengertian	5
2.1.2 Polaritas Komponen Harmonisa	7
2.1.3 Indeks Harmonisa	8
2.1.4 Standard Harmonisa	9
2.2 Filter pasif	10
2.2.1 <i>Single tuned filter</i>	10
2.2.2 Perancangan filter <i>single tuned</i>	12
2.3 Whale Optimization Algoritma (WOA)	13
2.3.1 Inspirasi	13
2.3.2 Model matematika dan algoritma optimasi	14
2.3.3 <i>Flowchart Whale Optimization Algorithm</i>	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 <i>Backward-forward sweep</i> pada RDS	21
3.1.1 <i>Backward sweep</i>	21

3.1.2	<i>Forward sweep</i>	23
3.1.3	<i>Flowchart algoritma backward-forward</i> pada RDS	25
3.2	Algoritma <i>harmonic load flow</i> (HLF)	26
3.2.1	<i>Backward sweep</i> HLF	27
3.2.2	<i>Forward sweep</i> HLF	29
3.2.3	<i>Flowchart algoritma</i> HLF	33
3.3	Perancangan <i>single tuned</i> filter	34
3.4	Optimasi filter dengan <i>whale optimization algorithm</i> (WOA)	35
3.4.1	<i>Objective function</i>	36
3.4.2	<i>Equality dan Inequality constraint</i>	37
3.4.3	Strategi optimasi menggunakan WOA	37
3.5	Data <i>standard test system</i>	40
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA DATA		43
4.1	Aliran daya <i>backward-forward sweep</i> dan aliran daya harmonisa HLF	43
4.1.1	Aliran daya <i>backward-forward sweep</i>	43
4.1.2	Aliran daya harmonisa HLF	46
4.2	Optimasi filter pasif <i>single tuned</i> menggunakan WOA	52
4.2.1	Optimasi WOA filter <i>single tuned</i> 5 th	52
4.2.2	Optimasi WOA filter <i>single tuned</i> 5 th dan 7 th	58
BAB 5 KESIMPULAN		65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran	66
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN		69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Gelombang <i>non-linier</i> dengan menambahkan harmonisa ketiga frekuensi fundamental (C. Sankaran, 2002).....	6
Gambar 2-2 Frekuensi fundamental, kelipatan kedua, dan kelipatan ketiga.(C. Sankaran, 2002).	6
Gambar 2-3 Rangkaian filter pasif <i>single tuned</i> beserta kurva impedansi terhadap frekuensi.	10
Gambar 2-4 Teknik <i>buble-net</i> dari <i>humpback whale</i>	14
Gambar 2-5 Vektor posisi pergerakan <i>whale</i> pada permasalahan 2D dan 3D serta kemungkinan pergerakan <i>whale</i> ke posisi selanjutnya (X^* adalah posisi terbaik saat ini).	16
Gambar 2-6 Mekanisme <i>buble-net</i> dimana X^* adalah posisi terbaik pada iterasi ke- t . a) mekanisme <i>shrinking encircling</i> b) <i>spiral updating position</i>	16
Gambar 2-7 Mekanisme eksplorasi WOA dimana X^* adalah posisi terbaik yang terpilih secara acak.	18
Gambar 2-8 <i>Flowchart Whale Optimization Algorithm (WOA)</i>	20
Gambar 3-1 <i>Single line diagram RDS 6-bus</i>	22
Gambar 3-2 <i>Flowchart backward-forward sweep</i> pada RDS.....	25
Gambar 3-3 <i>Single line diagram distorted RDS 6-bus</i>	26
Gambar 3-4 <i>Flowchart harmonic load flow (HLF) backward-forward sweep</i> dengan mempertimbangkan adanya filter pasif.	33
Gambar 3-5 <i>Single tuned filter</i> pada <i>network</i>	34
Gambar 3-6 <i>Flowchart</i> strategi optimasi filter dengan menggunakan WOA.	39
Gambar 3-7 <i>Single line diagram standard test system 13-bus</i>	41
Gambar 4-1 Grafik perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental sebelum pemasangan filter.	44
Gambar 4-2 Grafik perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.....	45
Gambar 4-3 Grafik perbandingan THD (%) <i>backward-forward HLF</i> dengan <i>Newton-Raphson</i> sebelum pemasangan filter.	47
Gambar 4-4 Grafik perbandingan tegangan rms <i>backward-forward HLF</i> dengan <i>Newton-Raphson</i> sebelum pemasangan filter.	48
Gambar 4-5 Grafik perbandingan THD (%) <i>backward-forward HLF</i> dengan <i>Newton-Raphson</i> setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.	50
Gambar 4-6 Grafik perbandingan tegangan rms <i>backward-forward HLF</i> dengan <i>Newton-Raphson</i> setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.	51
Gambar 4-7 Optimasi WOA dengan inisialisasi posisi secara acak ST filter 5 th	54
Gambar 4-8 Perbandingan THD (%) sebelum pemasangan filter dengan THD (%) hasil optimasi WOA ST filter 5 th	55

Gambar 4-9 Grafik perbandingan P_{loss} sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th .	56
Gambar 4-10 Grafik perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th .	57
Gambar 4-11 Optimasi WOA pada inisialisasi posisi acak ST filter 5 th dan 7 th .	59
Gambar 4-12 Perbandingan THD (%) sebelum pemasangan filter dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th dan 7 th .	60
Gambar 4-13 Grafik perbandingan P_{loss} sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th dan 7 th .	61
Gambar 4-14 Grafik perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th dan 7 th .	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Polaritas dan komponen harmonik.	7
Tabel 2-2 Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik.	7
Tabel 2-3 <i>Voltage distortion limits</i> (Blooming, P.E, Carnovale, J. Daniel, 2007).	9
Tabel 2-4 <i>Current Distortion Limits</i> (IEEE Std 519-1992, 1993).	9
Tabel 3-1 Data saluran <i>standard test system</i> 13-bus.	40
Tabel 3-2 Data beban <i>standard test system</i> 13-bus.	40
Tabel 3-3 Injeksi arus harmonisa pada beban.	41
Tabel 4-1 Perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental sebelum pemasangan filter.	44
Tabel 4-2 Perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300KVAR.	45
Tabel 4-3 Perbandingan THD (%) <i>backward-forward</i> HLF dengan <i>Newton-Raphson</i> sebelum pemasangan filter.	46
Tabel 4-4 Perbandingan tegangan rms <i>backward-forward</i> HLF dengan <i>Newton-Raphson</i> sebelum pemasangan filter.	47
Tabel 4-5 Rugi-rugi daya (<i>Ploss</i>) pada tiap orde harmonisa sebelum pemasangan filter.	48
Tabel 4-6 Perbandingan THD (%) <i>backward-forward</i> HLF dengan <i>Newton-Raphson</i> setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.	49
Tabel 4-7 Perbandingan tegangan rms <i>backward-forward</i> HLF dengan <i>Newton-Raphson</i> setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.	50
Tabel 4-8 Rugi-rugi daya (<i>Ploss</i>) pada tiap orde harmonisa setelah pemasangan filter <i>single tuned</i> order ke-5 pada bus 3 sebesar 300KVAR.	51
Tabel 4-9 THD hasil HLF ST filter 5 th menggunakan optimasi WOA.	55
Tabel 4-10 <i>Ploss</i> sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th	56
Tabel 4-11 Perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi ST filter 5 th	57
Tabel 4-12 THD (%) hasil <i>backward-forward</i> HLF ST filter 5 th dan 7 th menggunakan optimasi WOA.	60
Tabel 4-13 <i>Ploss</i> sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5 th dan 7 th	61
Tabel 4-14 Perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi ST filter 5 th dan 7 th	62

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Terlepas dari keunggulan sistem distribusi radial (RDS), sistem jaringan ini sangat rentan terhadap penyebaran harmonisa. Dengan semakin majunya zaman yang disertai dengan semakin majunya perkembangan teknologi memicu semakin besarnya penggunaan beban non-linier, seperti penggunaan peralatan *switching-control* pada beban industri serta peralatan elektronik lainnya seperti komputer dan lain sebagainya. Secara umum, sumber harmonisa pada beban dibagi menjadi: (1) beban domestik, (2) beban industri, dan (3) peralatan kontrol (A.I. Maswood, M.H. Haque, 2002). Sumber harmonisa pada beban menghasilkan arus yang tidak sinusoidal meskipun sumber tegangan yang dipakai adalah gelombang sinusoidal murni. Setiap gelombang periodik yang tidak berbentuk sinus mengandung harmonisa (C. Sankaran, 2002). Beban listrik non-linier merupakan penyebab arus harmonisa yang tinggi terjadi pada sistem kelistrikan. Penyebaran harmonisa dalam sistem distribusi daya listrik tersebut menimbulkan kerugian dalam penyaluran energi listrik dan kerusakan pada peralatan.

Meninjau akibat yang ditimbulkan dari penyebaran harmonisa tersebut, maka analisis aliran daya harmonisa diperlukan untuk mengetahui dan menganalisa penyebaran dan besar harmonisa pada sistem. Penyebaran harmonisa dalam sistem distribusi radial dapat dianalisa dengan menggunakan metode analisis aliran daya *backward-forward* pada sistem distribusi radial/*radial distribution system* (RDS) serta *harmonic power flow* (HLF) (Teng J. H., 2007). Analisis aliran daya *backward-forward* digunakan untuk mendapatkan profil tegangan pada tiap bus serta rugi-rugi daya pada frekuensi fundamental, sedangkan HLF digunakan untuk mendapatkan profil tegangan distorsi pada tiap bus tiap ordenya, serta rugi-rugi daya harmonisa yang disebabkan oleh pemasangan beban non-linear/sumber harmonisa.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini. Optimasi ukuran dan penempatan kapasitor juga telah dilakukan pada RDS yang

terdistorsi harmonisa (Fitriana S, 2014). Optimasi filter juga telah dilakukan dengan menggunakan *ant colony* untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem (F.M Alhaddad, 2014). Seiring dengan pesatnya penelitian pada teknik *metaheuristik*, pada tahun 2016 Sayedali mirjalili dan Andrew Lewis mengembangkan teknik algoritma optimasi *Whale Optimization Algoritm* (WOA). Algoritma WOA digunakan untuk mendapatkan nilai optimum dari suatu fungsi, baik nilai maksimum atau minimum (S Mirjalili, A. Lewis, 2016). Oleh karena itu dalam penelitian ini algoritma digunakan untuk mendapatkan nilai minimum dari fungsi objektif yaitu untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem yang terdistorsi harmonisa.

Dalam berbagai penelitian menunjukkan bahwa distorsi tegangan dan arus yang paling sering terjadi pada sistem distribusi adalah harmonisa urutan kelima dan dan tujuh (Akagi, 2006). Oleh karena itu dalam penelitian ini strategi optimasi pemasangan *single-tuned* filter pasif ditujukan pada ketiga orde harmonik tersebut dengan optimasi kapasitas filter dalam kVAR serta optimasi lokasi pemasangan filter berdasarkan rugi-rugi daya.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini, beberapa hal yang akan dibahas yaitu:

1. Bagaimana metode aliran daya *backward-forward sweep* serta *harmonic load flow* (HLF) dengan memperhitungkan adanya filter pada jaringan dapat digunakan pada sistem distribusi radial.
2. Bagaimana *Whale Optimization Algoritm* (WOA) dapat diterapkan untuk mendapatkan ukuran serta posisi optimum dengan tujuan untuk mendapatkan rugi-rugi daya total minimum dengan memperhitungkan besar tegangan efektif serta standard minimum *total harmonic distortion* (THD) pada *standard test system*.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Memperoleh integrasi penggunaan filter pasif dengan metode *backward-forward sweep* dalam menghitung aliran daya pada RDS serta dalam menghitung aliran daya harmonisa/*harmonic load flow* (HLF).
2. Mencari perbandingan metode analisis aliran daya harmonisa yang digunakan dengan analisis aliran daya harmonisa yang sudah tervalidasi.
3. Mendapatkan ukuran serta posisi optimum dengan tujuan untuk mendapatkan rugi-rugi daya total minimum dengan memperhitungan besar tegangan efektif serta standard minimum *total harmonic distortion* (THD) dengan menggunakan WOA.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal:

1. Studi aliran daya harmonisa yang dilakukan hanya terbatas untuk sistem distribusi radial seimbang.
2. Sumber harmonisa telah didapatkan dari data awal (tidak melalui penurunan model dari awal).
3. Metode yang digunakan untuk studi aliran daya *backward-forward* RDS serta *harmonic load flow* (HLF) ini adalah implementasi model *single-tuned filter*.
4. Optimasi penempatan dan kapasitas filter dengan tujuan untuk mendapatkan rugi-rugi daya total minimum dengan memperhitungan besar tegangan efektif serta standar minimum *total harmonic distortion* (THD) dilakukan dengan menggunakan WOA.

1.5 Kontribusi

Rugi-rugi total (pada frekuensi fundamental dan frekuensi harmonik) serta harmonisa pada sistem distribusi radial diharapkan dapat dideteksi dan dikurangi dengan metode yang dirancang. Pengembangan penelitian ini adalah optimasi penentuan letak dan perhitungan nilai optimum filter pada RDS yang terdistorsi dengan menggunakan *whale optimization algorithm* (WOA) untuk mengurangi rugi-rugi total, menjaga tegangan efektif tiap bus, serta untuk mengurangi *total harmonic distortion* (THD). Diharapkan penelitian ini dapat memberi kontribusi untuk menyelesaikan permasalahan kualitas daya secara khusus total rugi-rugi daya serta harmonisa yang terdapat pada sistem distribusi radial.

1.6 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Melakukan pengumpulan pustaka yang dibutuhkan meliputi: harmonisa, perancangan filter harmonisa pasif, aliran daya pada RDS, studi aliran daya harmonisa (HLF) dengan mempertimbangkan adanya filter, serta *whale optimization algorithm* (WOA).
2. Membuat perancangan filter harmonisa pasif pada sebuah tes sistem RDS dengan menggunakan *backward-forward sweep* untuk studi aliran daya serta aliran daya harmonisa (HLF) dan selanjutnya melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Matlab R2012a*.
3. Melakukan analisa data komparasi nilai rugi-rugi daya total serta harmonisa sebelum dan setelah pemasangan filter, sekaligus komparasi nilai rugi-rugi daya total serta harmonisa sebelum dan setelah optimasi kapasitas dan letak optimum hasil dari optimasi WOA.
4. Menarik kesimpulan dari hasil optimasi WOA dengan memperhitungkan rugi-rugi daya total, tegangan efektif, dan standar minimum THD pada *standard test system*.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Harmonisa

2.1.1 Pengertian

Dari sumber tenaga listrik atau pembangkit listrik, tenaga disalurkan dalam bentuk tenaga dan arus bolak balik sinusodial dengan frekuensi tertentu. Dan bentuk inilah yang dicatu pada berbagai jenis peralatan listrik. Namun dengan semakin majunya zaman yang disertai dengan semakin majunya perkembangan teknologi menjadikan beban semakin variatif, sehingga timbul fenomena sumber tegangan yang disalurkan tidak lagi berbentuk sinusodial murni dengan kata lain bentuk gelombang mengalami distorsi. Distorsi bentuk gelombang sinusodial ini ada beberapa macam, diantaranya *harmonic*, *interharmonic*, *Noise*, *Notching*, dan *DC offset*.

Pada distorsi *harmonic* dan *interharmonic*, gelombang tegangan arus bolak balik tersebut tidak murni sinusodial dengan kata lain terdistorsi. Berdasarkan *fourier* gelombang tersebut dapat diuraikan menjadi beberapa gelombang sinusodial dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi fundamental. Pada distorsi *interharmonic*, gelombang distorsi terbentuk dari gelombang-gelombang sinusodial dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi gelombang fundamental, dengan kelipatan berupa bilangan pecahan. Sedangkan pada distorsi *harmonic*, gelombang distorsi terbentuk dari gelombang-gelombang sinusodial dengan frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental. Persamaan frekuensi harmonik dapat ditulis sebagai berikut :

$$f_h = h \cdot f_d \quad (2-1)$$

dengan,

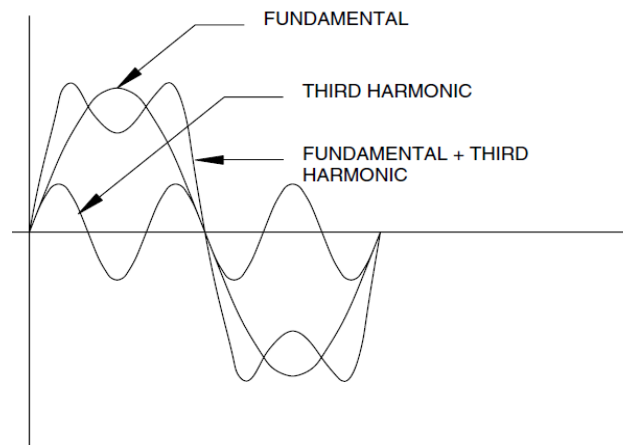
f_h = Frekuensi harmonik (Hz).

h = Orde harmonik.

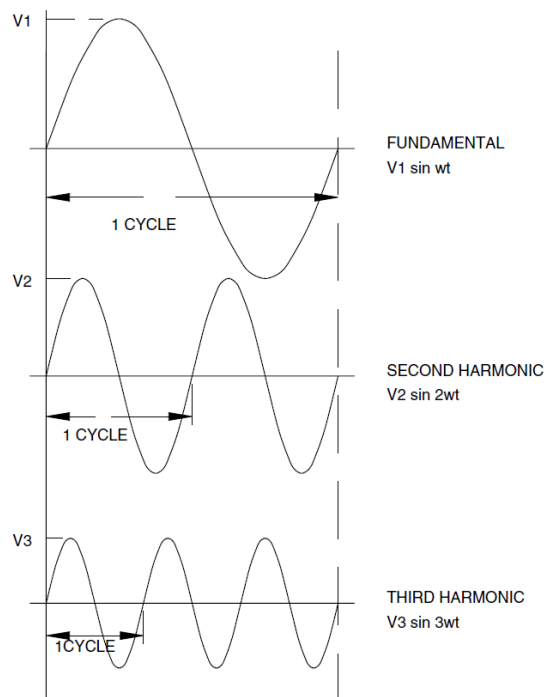
f_d = Frekuensi fundamental (Hz).

Di Indonesia frekuensi fundamental yang digunakan adalah 50 Hz, sehingga frekuensi harmonik untuk sistem tenaga listrik di Indonesia adalah:

$$f_h = h.50 \quad (2-2)$$



Gambar 2-1 Gelombang *non-linier* dengan menambahkan harmonisa ketiga frekuensi fundamental (C. Sankaran, 2002).



Gambar 2-2 Frekuensi fundamental, kelipatan kedua, dan kelipatan ketiga.(C. Sankaran, 2002).

2.1.2 Polaritas Komponen Harmonisa

Urutan polaritas harmonik pertama adalah positif. Urutan polaritas harmonik kedua adalah negatif, harmonik ketiga adalah nol, dan harmonik ke empat adalah positif (berulang berurutan sampai seterusnya).

Tabel 2-1 Polaritas dan komponen harmonik.

Frekuensi (Hz)	Indeks Harmonisa	Urutan
50	1	+
100	2	-
150	3	0
200	4	+
300	5	-
350	6	0
400	7	+
450	8	-

Dengan demikian, pola urutan fasa setiap orde harmonik adalah sebagai berikut:

- Urutan fasa positif (*positive sequence*) = $3h + 1$
- Urutan fasa negatif (*negative sequence*) = $3h - 1$
- Urutan fasa nol (*zero sequence*) = $3h$

Tabel 2-2 Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik.

Urutan	Pengaruh pada motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif	Menimbulkan medan magnet putar arah maju (<i>forward</i>)	▪ Panas
Negatif	Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (<i>revers</i>)	▪ Panas ▪ Arah putaran motor berubah
Nol	Tidak ada	▪ Panas ▪ Menimbulkan/menambah arus pada kawat netral

2.1.3 Indeks Harmonisa

Menurut *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari masing-masing arus harmonisa dibandingkan dengan nilai RMS arus fundamental atau harmonisa pertama. Berdasarkan metode ini, maka harmonisa pertama atau arus fundamental selalu bernilai 100%. Rumus perhitungan IHD menurut IEEE adalah sebagai berikut (C. Sankaran, 2002):

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa dan nilai rms dari fundamental yang dinyatakan dalam persen (%) (C. Sankaran, 2002):

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 \dots)} \quad (2-4)$$

$$THD = (I_H / I_1) \times 100\% \quad (2-5)$$

Total Harmonic Distortion (THD) indeks yang umum digunakan adalah:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N V_n^2}{V_1^2}} \quad (2-6)$$

dengan,

V_n = Tegangan rms pada harmonisa ke n (V).

V_1 = Tegangan fundamental (V).

N = Maksimum harmonisa.

Pendefinisian rasio nilai rms komponen harmonisa ke nilai rms komponen dasar biasanya dinyatakan dalam bentuk persen. Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinus sempurna. Nilai THD adalah nol pada saat terjadi gelombang sinus sempurna.

2.1.4 Standard Harmonisa

% VTHD adalah persentasi total tegangan yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamental dan % ITHD adalah persentasi jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamental. Standar harmonisa tegangan yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992, p.85. untuk *Voltage Harmonic Distortion* adalah sebagai berikut :

Tabel 2-3 *Voltage distortion limits* (Blooming, P.E, Carnovale, J. Daniel, 2007).

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion ITHD(%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
NOTE: High-voltage systems can have up to 2,0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for user		

Standar harmonisa arus yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992 yaitu untuk *Current Distortion Limits* adalah sebagai berikut.

Tabel 2-4 *Current Distortion Limits* (IEEE Std 519-1992, 1993).

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above

Current distortions that result in a dc offset , e.g., half-wave converters, are not allowed

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

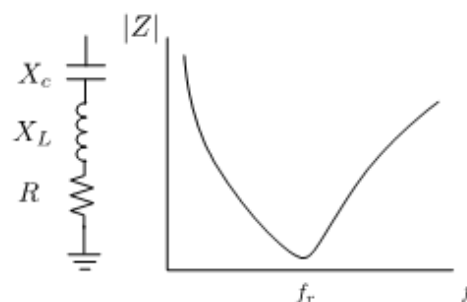
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC

2.2 Filter pasif

Salah satu alat yang dapat digunakan untuk meredam harmonisa dalam memperbaiki faktor daya adalah filter pasif. Filter pasif terdiri dari komponen seperti Kapasitor (C), Induktor (L), dan Resistor (R) yang diatur untuk meredam harmonisa. Filter pasif sangat umum digunakan karena tidak mahal dibandingkan dengan pengeliminasi distorsi harmonisa yang lain. Kekurangannya adalah adanya kemungkinan respon dengan sistem tenaga listrik dapat merugikan dan penting untuk memeriksa/memperhitungkan respon keseluruhan sistem pada saat melakukan desain.

2.2.1 *Single tuned filter*

Rangkain filter *single tuned* dan kurva impedansi filter terhadap frekuensi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2-3 Rangkaian filter pasif *single tuned* beserta kurva impedansi terhadap frekuensi.

Single tuned filter merupakan salah satu filter pasif yang terdiri dari komponen-komponen pasif yaitu R, L dan C yang terhubung secara seri. Filter ini paling banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik industri dalam hal mengatasi harmonisa, hal ini dikarenakan filter *single tuned* lebih efisien

Single tuned filter mempunyai impedansi yang kecil pada frekuensi resonansi, sehingga arus yang mempunyai frekuensi sama dengan frekuensi resonansi akan dibelokkan melalui filter. Dari Gambar 2-3 besarnya impedansi

single tuned filter pada frekuensi fundamental dapat dilihat pada persamaan dibawah:

$$Z_F = R + j(X_L - X_C) \quad (2-7)$$

Sedangkan besarnya impedansi *single tuned* filter pada frekuensi resonansi dari Persamaan (2.7) menjadi:

$$Z_F = R + j\left(\omega_r L - \frac{1}{\omega_r C}\right) \quad (2-8)$$

Jika frekuensi sudut saat resonansi adalah:

$$\omega_r = 2\pi f_0 h_r \quad (2-9)$$

Persamaan impedansi filter adalah sebagai berikut:

$$Z_F = R + j\left(2\pi f_0 h_r L - \frac{1}{2\pi f_0 h_r C}\right)$$

$$Z_F = R + j\left(X_L h_r - \frac{X_C}{h_r}\right) \quad (2-10)$$

Nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saat resonansi sama besar maka impedansi filter akan diperoleh:

$$Z_F = R \quad (2-11)$$

Dari Persamaan (2.11) terlihat bahwa pada frekuensi resonansi, filter akan mempunyai impedansi yang sangat kecil, lebih kecil dari impedansi beban yaitu sama dengan tahanan induktor R, sehingga arus harmonisa yang mempunyai frekuensi sama dengan frekuensi resonansi yang akan dialirkan atau dibelokkan melalui filter dan tidak mengalir ke sistem. Pada dasarnya sebuah *single tuned* filter dipasang untuk setiap harmonisa yang akan dihilangkan. Filter ini dihubungkan pada busbar dimana pengurangan tegangan harmonisa ditentukan.

Dua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan nilai R, L, dan C adalah:

a. Faktor kualitas (Q)

Faktor kualitas dari filter menunjukkan ketajaman pengaturan filter dalam mengeliminasi harmonik. Pada filter *single tuned*, faktor kualitas Q didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada frekuensi resonansi terhadap resistansi. Persamaannya dapat dinyatakan sebagai berikut (Dugan, et al, 2004):

$$Q = \frac{X_o}{R} \quad (2-12)$$

Filter dengan Q tinggi diatur pada frekuensi rendah dan nilainya biasanya berkisar antara 30 dan 60. Filter yang efektif harus memiliki induktor dengan kualitas yang besar, oleh karena itu $R \ll X_o$ pada frekuensi resonansi. Perkiraan nilai Q untuk reaktor inti udara adalah 75 dan untuk reaktor inti besi diatasnya (Dugan, et al, 2004).

b. Penyimpangan frekuensi relatif δ

Penyimpangan frekuensi relatif menyatakan perubahan frekuensi dari frekuensi nominal pengaturan, yang dinyatakan oleh:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega} \quad (2-13)$$

Faktor δ dipengaruhi oleh:

- 1) Variasi frekuensi dasar.
- 2) Frekuensi kapasitansi dan induktansi dari filter karena pengaruh suhu dan penuaan.
- 3) *Initial off-tuning* yang disebabkan oleh toleransi pabrik dan batas ukuran langkah pengaturan.

2.2.2 Perancangan filter *single tuned*

Perancangan filter *single tuned* untuk menentukan besarnya komponen-komponen dari filter *single tuned* tersebut, dimana filter *single tuned* terdiri dari hubungan seri komponen-komponen pasif induktor, kapasitor dan tahanan.

Adapun langkah perancangan filter pada frekuensi ke h sebagai berikut (Soedibyo & Sjamsjul Anam, 2012):

- a. Menentukan ukuran kapasitor berdasarkan kebutuhan daya reaktif untuk perbaikan faktor daya. Dimana daya reaktif kapasitor dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\Delta Q = P(\tan \varphi_{awal} - \tan \varphi_{target}) \quad (2-14)$$

- b. Menentukan reaktansi kapasitor

$$X_c = \frac{V^2}{\Delta Q} \quad (2-15)$$

- c. Menentukan kapasitansi dari kapasitor

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_c} \quad (2-16)$$

- d. Menentukan reaktansi induktif

$$X_L = \frac{X_c}{h_n^2} \quad (2-17)$$

- e. Menentukan induktansi

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} \quad (2-18)$$

- f. Menentukan nilai resistansi

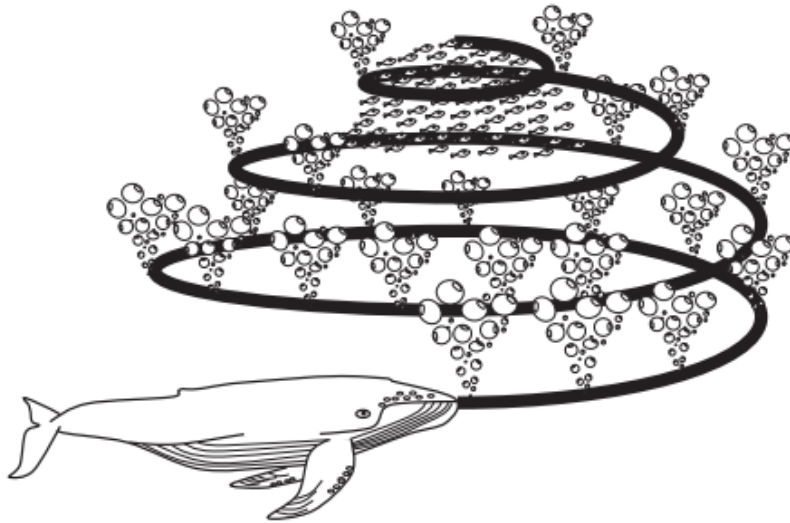
$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (2-19)$$

2.3 Whale Optimization Algorithm (WOA)

2.3.1 Inspirasi

Whale Optimization Algorithm (WOA) adalah salah satu algoritma optimasi yang dikembangkan oleh Sayedali Mirjalili dan Andrew Lewis. *Whale* atau ikan paus merupakan salah satu mamalia terbesar didunia. Terdapat 7 jenis ikan paus salah satunya adalah *humpback whale*/paus bungkuk. *Humpback*

whale/ikan paus bungkuk sangat cerdas karna mempunyai sel spindel dalam otak mereka. Ikan paus hidup secara berkelompok dan dapat berkomunikasi satu dengan yang lain. Salah satu hal yang menarik dari ikan paus bungkuk ini adalah cara berburu mereka. Makanan favorit dari ikan paus bungkuk ini adalah *krill* atau gerombolan ikan-ikan kecil.



Gambar 2-4 Teknik *buble-net* dari *humpback whale*.

Teknik berburu ikan paus bungkuk ini sering disebut dengan teknik *bubble-net*. Sekumpulan *whale* atau ikan paus akan mengelilingi target mangsa sambil mengeluarkan *bubble*. Diameter keliling ini akan semakin lama semakin kecil untuk mempersempit ruang gerak target, dan *bubble* yang dikeluarkan akan menjadi jaring untuk menangkap mangsa. Kemudian salah satu *whale* akan berenang keatas melewati jaring *bubble* dan menangkap semua mangsa yang terjaring sebelumnya.

2.3.2 Model matematika dan algoritma optimasi

Terdapat tiga model matematika yang digunakan pada teknik *bubble-net feeding* dari algoritma ini:

a. *Encircling Prey/ Mengelilingi Mangsa*

Pada tahap ini *humpback whale* atau paus bungkuk mengenali lokasi dari target mangsa, setelah itu paus bungkuk ini akan mengelilingi target. Oleh karena itu posisi optimal dalam ruang pencarian tidak diketahui secara apriori, dengan demikian algoritma WOA mengasumsikan bahwa solusi terbaik saat ini adalah target mangsa yang dikelilingi atau dapat dikatakan posisi optimum saat ini adalah mendekati optimal. Setelah *search agent*/ikan pencari terbaik didefinisikan, maka ikan yang lain akan mencoba memperbarui posisi-posisi mereka mendekati posisi ikan terbaik. Perilaku ini dapat ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (2-20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2-21)$$

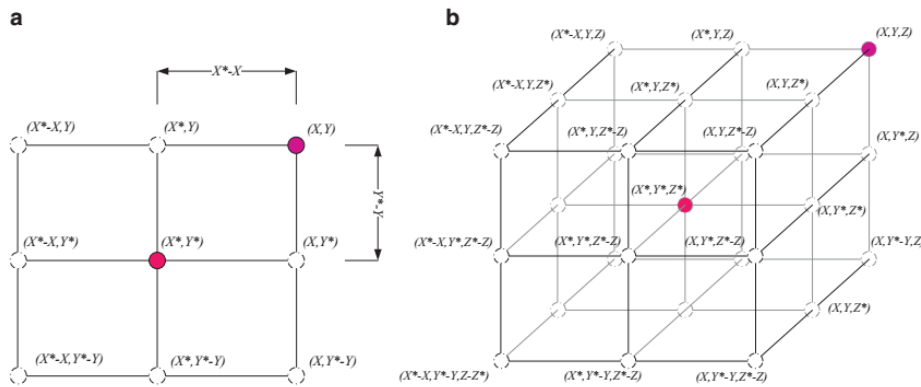
Di mana t menunjukkan iterasi saat ini, \vec{A} dan \vec{C} adalah koefisien vektor, \vec{X}^* merupakan vektor posisi dari solusi terbaik yang didapatkan saat ini, \vec{X} adalah vektor posisi yang akan diperbaharui, sedangkan $| \cdot |$ adalah nilai absolut. Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa \vec{X}^* harus diperbarui pada tiap iterasi jika menemukan solusi yang lebih baik daripada iterasi sebelumnya. Vektor \vec{A} dan \vec{C} dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2 \cdot \vec{r} \end{aligned} \quad (2-22)$$

Di mana \vec{a} adalah pengurangan linear dari 2 ke 0 selama iterasi baik dalam fase eksplorasi maupun eksploitasi (yang akan dijelaskan nanti) dan \vec{r} adalah vektor random dalam $[0,1]$.

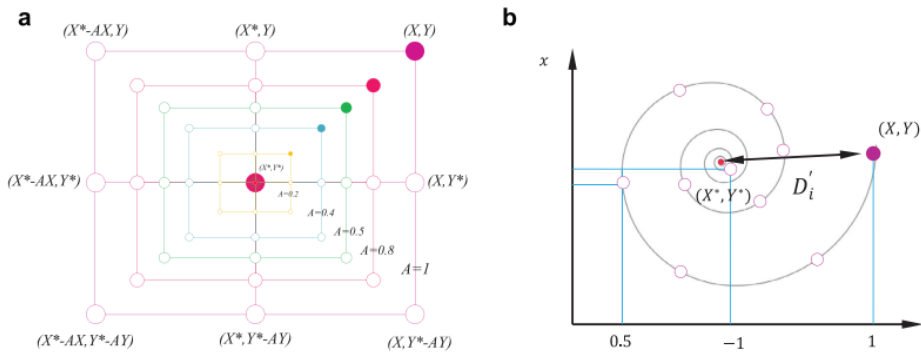
Gambar 2-5 (a) mengilustrasikan pergerakan whale dari persamaan (2.21) pada permasalahan dua dimensi (2D). Posisi (X,Y) dari sebuah ikan pencari dapat diperbarui berdasarkan posisi terbaik saat ini (X^*,Y^*) . Posisi-posisi berbeda di sekitar ikan terbaik dapat dicapai dengan memperhatikan posisi ikan lain saat ini dan menyesuaikan dengan nilai vektor \vec{A} dan \vec{C} .

Kemungkinan pergerakan posisi dari ikan pencari pada permasalahan tiga dimensi (3D) diilustrasikan pada Gambar 2-5(b). Perlu diperhatikan bahwa dengan mendefinisikan random vektor (\vec{r}), ikan pencari dapat mencapai posisi manapun pada lingkup ruang pencarian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2-5. Dengan demikian, persamaan (2.21) memungkinkan beberapa ikan pencari lain memperbarui posisinya untuk mendekati posisi ikan terbaik saat ini sehingga pergerakan dari kumpulan ikan pemburu tersebut akan mengelilingi mangsa.



Gambar 2-5 Vektor posisi pergerakan *whale* pada permasalahan 2D dan 3D serta kemungkinan pergerakan *whale* ke posisi selanjutnya (X^* adalah posisi terbaik saat ini).

Konsep yang sama dapat digunakan untuk ruang pencari dengan n dimensi. Sekumpulan ikan pencari akan bergerak pada *hyper-cubes* mengelilingi solusi terbaik yang telah diperoleh pada iterasi ke t .



Gambar 2-6 Mekanisme *bubble-net* dimana X^* adalah posisi terbaik pada iterasi ke- t . a) mekanisme *shrinking encircling* b) *spiral updating position*.

b. *Buble-Net Attack* / Fase Eksploitasi

Secara matematis fase eksploitasi ini dapat dimodelkan dalam dua tahap sebagai berikut:

1. Mekanisme *shrinking encircling*

Mekanisme ini didapatkan dengan mengurangi nilai dari \vec{a} pada persamaan (2.22). Perlu diperhatikan perubahan nilai *range* \vec{A} juga akan berkurang seiring dengan pengurangan \vec{a} . Dengan kata lain \vec{A} adalah nilai random pada interval $[-a, a]$, dimana a berkurang secara linier dari 2 ke 0 pada setiap iterasi. Dengan mengatur nilai random \vec{A} pada $[-1, 1]$, posisi terbaru dari ikan pencari dapat berubah sesuai dengan interval *range* tersebut terhadap posisi solusi terbaik. Pada gambar 2-6 (a) ditunjukkan bahwa pada permasalahan 2D pergerakan posisi (X, Y) terhadap (X^*, Y^*) dapat dicapai pada range $0 \leq A \leq 1$.

2. *Spiral updating position*

Seperti terlihat pada gambar 2-6 (b), pendekatan dilakukan dengan menghitung posisi dari posisi ikan (X, Y) ke posisi dimana terdapat mangsa yaitu (X^*, Y^*) . Adapun persamaan spiral yang dibuat antara posisi ikan dengan mangsa menirukan pergerakan spiral pada *humpback whale* adalah sebagai berikut:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (2-23)$$

Dimana $\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$, serta menunjukkan jarak ikan paus ke i terhadap target (solusi terbaik). b adalah konstanta untuk mendefinisikan bentuk spiral logaritma, l adalah bilangan random antara $[-1, 1]$.

Perlu diperhatikan bahwa ikan paus bungkuk berenang melingkar dalam lingkaran melengkung dan sepanjang jalur spiral secara bersamaan. Untuk memodelkan perilaku simultan ini, diasumsikan terdapat peluang 50% ikan paus ke i memilih antara mekanisme *shrinking encircling* atau *spiral updating position* untuk memperbarui posisi selama iterasi. Sehingga dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0,5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi d) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (2-24)$$

Dimana p adalah bilangan random pada interval $0 \leq p \leq 1$ atau $[0,1]$.

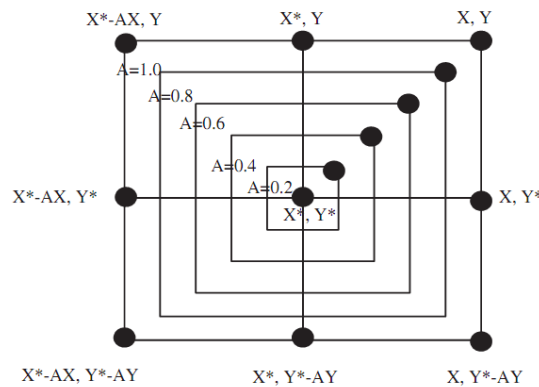
c. Pencarian mangsa (eksplorasi) / *Search for prey*

Pendekatan yang sama berdasarkan variasi vektor \vec{A} dapat digunakan pada tahap pencarian mangsa atau fase eksplorasi. Pada kenyataannya, ikan paus mencari mangsa secara random dengan memperhatikan posisi satu sama lain. Oleh karena itu, digunakan nilai random \vec{A} lebih besar dari 1 atau kurang dari -1 untuk memaksa ikan pencari i bergerak menjauh dari ikan acuan. Berbeda dengan fase eksploitasi, pada fase eksplorasi ini posisi ikan pencari i akan menyesuaikan dengan posisi dari ikan pencari yang dipilih secara acak, bukan agen pencari terbaik yang telah ditemukan. Fase ekplorasi ini akan dilakukan jika $|\vec{A}| > 1$, pada fase ekplorasi ini algoritma WOA akan melakukan pencarian global. Model matematisnya sebagai berikut:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X} \right| \quad (2-25)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2-26)$$

Dimana \vec{X}_{rand} adalah vektor posisi acak yang dipilih sesuai dengan jumlah populasi ikan.



Gambar 2-7 Mekanisme eksplorasi WOA dimana X^* adalah posisi terbaik yang terpilih secara acak.

Algoritma WOA dimulai dengan mendapatkan nilai optimum secara acak. Pada tiap iterasi ikan pencari ke i akan bergerak mendekati posisi ikan yang dipilih secara acak atau posisi ikan terbaik. Parameter a berkurang secara linier dari 2 ke 0 dengan tujuan untuk melakukan eksplorasi atau eksploitasi. Posisi acak akan dipilih ketika $|\vec{A}| > 1$, sedangkan solusi terbaik akan ditentukan ketika $|\vec{A}| < 1$, untuk memperbarui posisi dari ikan pencari. Dengan bergantung pada nilai p , WOA mampu menghubungkan antara pergerakan spiral atau melingkar (*circular*). Secara umum algoritma WOA dapat ditulis pada *pseudocode* dibawah:

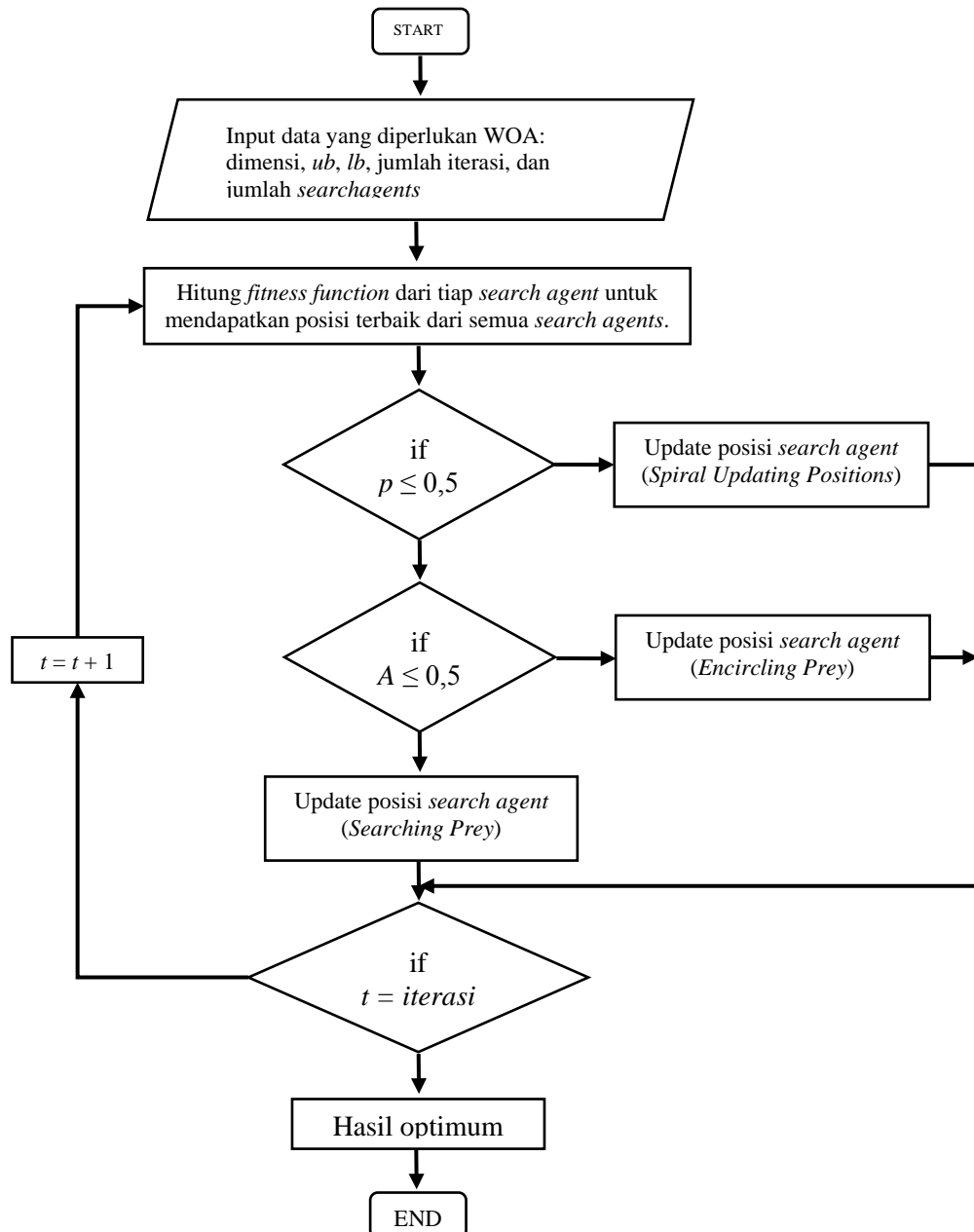
```

Inisialisasi populasi ikan  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
Hitung fitness function tiap ikan pencari
 $X^*$  = posisi terbaik
While ( $t <$  iterasi maksimum)
    For setiap ikan pencari
        Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$  dan  $p$ 
        If1 ( $p < 0,5$ )
            If2 ( $|\vec{A}| < 1$ )
                Tahap Encircling prey / hitung persamaan 2.21
            Else if2 ( $|\vec{A}| > 1$ )
                Pilih random ( $X_{rand}$ )
                Tahap eksplorasi / hitung persamaan 2.26
            Endif2
        Else if1 ( $p \geq 0,5$ )
            Tahap eksploitasi / hitung persamaan 2.24
        Endif1
    End for
    Cek jika ada ikan yang melebihi lingkup pencarian
    Hitung fitness function
    Update  $X^*$  jika lebih baik
     $t = t + 1$ 
End while
Return  $X^*$ 

```

2.3.3 Flowchart Whale Optimization Algorithm

Dari uraian persamaan matematika dan *pseudocode* dari algoritma WOA diatas dapat digambarkan pada *flowchart* algoritma dibawah:



Gambar 2-8 Flowchart Whale Optimization Algorithm (WOA).

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini akan dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu sebagai berikut :

1. Aliran daya pada sistem distribusi radial (RDS) dengan implementasi filter pasif menggunakan metode *backward-forward sweep*.
2. Aliran daya harmonisa (HLF) pada *distorted* RDS dengan implementasi filter pasif menggunakan metode *backward-forward sweep*.
3. Implementasi optimasi filter dengan menggunakan *Whale Optimization Algorithm* (WOA).

3.1 *Backward-forward sweep* pada RDS

Perhitungan aliran daya pada sistem distribusi radial (RDS) dengan implementasi filter pasif menggunakan metode *backward-forward sweep* dilakukan berdasarkan tahapan berikut:

3.1.1 *Backward sweep*

Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk studi aliran daya adalah dengan menggunakan metode *backward-forward sweep* yang telah dikembangkan oleh Teng (Teng J. H., 2007). Metode ini dipergunakan untuk persamaan aliran daya yang didasarkan pada dua buah matrik yaitu BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dan BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*). [BIBC] adalah matrik relasi antara arus injeksi pada bus dengan arus pada cabang, sedangkan [BCBV] adalah matrik relasi antara arus cabang dengan tegangan bus. Salah satu contoh pembentukan persamaan aliran daya ditunjukkan pada Gambar 3-1.

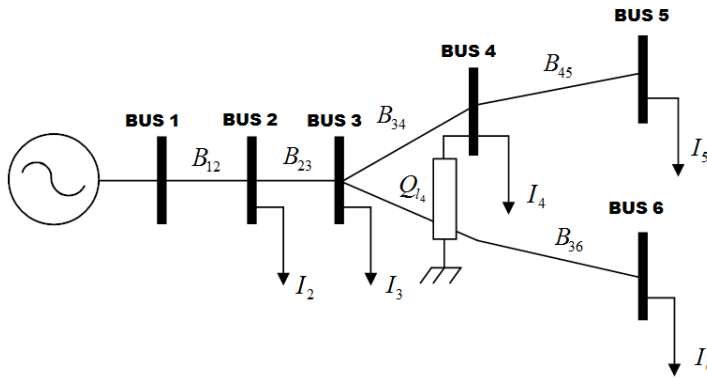
Gambar 3.1 merepresentasikan sebuah sistem distribusi dengan model rangkaian radial murni. Pada sistem ini beban yang tersebar dalam jalur tertentu disuplai dari sebuah sumber pada *infinite bus*. Besar arus pada bus 4 pada iterasi ke k (tanpa memperhatikan filter) adalah:

$$I_4^k = \left(\frac{S_4^{sch}}{V_4^k} \right)^* \quad (3-1)$$

Ketika filter dipasang pada bus 4, maka besar arus pada iterasi ke k menjadi:

$$I_4^k = \left(\frac{S_4^{sch}}{V_4^k} \right)^* - \left(\frac{jQ_{l_4}}{V_4^k} \right)^* \quad (3-2)$$

dimana Q_{l_4} adalah besar daya reaktif filter yang terdapat pada bus 4.



Gambar 3-1 *Single line diagram* RDS 6-bus.

Dengan menggunakan *Kirchhoff's current law* (KCL), pada *backward sweep* dimulai dari bus ke 6 sampai dengan bus 1 didapatkan arus injeksi sebagai berikut:

$$B_{36} = I_6$$

$$B_{45} = I_5$$

$$B_{34} = I_4 + I_5$$

$$B_{23} = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_{12} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan injeksi arus ini dapat dituliskan dalam bentuk matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{23} \\ B_{34} \\ B_{45} \\ B_{36} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [BIBC][I] \quad (3-3)$$

dimana $[BIBC]$ adalah matrik relasi antara arus cabang dengan arus injeksi pada bus.

3.1.2 Forward sweep

Dengan menggunakan KVL pada *forward sweep* didapatkan besar tegangan pada bus serta matrik relasi kedua. Dimulai dari bus 2 sampai dengan bus 6 didapatkan:

$$V_2 = V_1 - B_{12} \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_{12} \cdot Z_{12} - B_{23} \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_{12} \cdot Z_{12} - B_{23} \cdot Z_{23} - B_{34} \cdot Z_{34}$$

$$V_5 = V_1 - B_{12} \cdot Z_{12} - B_{23} \cdot Z_{23} - B_{34} \cdot Z_{34} - B_{45} \cdot Z_{45}$$

$$V_6 = V_1 - B_{12} \cdot Z_{12} - B_{23} \cdot Z_{23} - B_{36} \cdot Z_{36}$$

Maka besar *drop* tegangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_1 - V_2 = B_{12} \cdot Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_{12} \cdot Z_{12} + B_{23} \cdot Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_{12} \cdot Z_{12} + B_{23} \cdot Z_{23} + B_{34} \cdot Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_{12} \cdot Z_{12} + B_{23} \cdot Z_{23} + B_{34} \cdot Z_{34} + B_{45} \cdot Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_{12} \cdot Z_{12} + B_{23} \cdot Z_{23} + B_{36} \cdot Z_{36}$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk matrik BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*) yaitu sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{23} \\ B_{34} \\ B_{45} \\ B_{36} \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (3-4)$$

dimana $[BCBV]$ adalah matrik relasi antara tegangan bus dengan arus cabang. Dengan mensubstitusikan persamaan (3-3) dengan (3-4) didapatkan:

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I]$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (3-5)$$

dimana $[DLF]$ adalah matrik relasi antara *drop* tegangan dengan arus injeksi pada bus. Solusi aliran daya didapatkan dengan menggunakan proses iterasi, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$I_i^k = \left(\frac{P^{sch} + jQ^{sch}}{V_i^k} \right)^* \quad (3-6)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (3-7)$$

$$[V^{k+1}] = [V_0] - [\Delta V^{k+1}] \quad (3-8)$$

Dimana,

$[V_0]$ = Vektor inisial tegangan bus.

Proses iterasi berhenti ketika perbedaan mutlak antara injeksi arus bus iterasi sebelumnya dan injeksi arus bus iterasi saat ini kurang dari atau sama dengan toleransi yang ditentukan ε .

$$|I_i^{k+1} - I_i^k| \leq \varepsilon \quad (3-9)$$

Sehingga, total rugi-rugi daya riil dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{br} P_{loss_i} = \sum_{i=1}^{br} |B_i|^2 R \quad i = 1, 2, \dots, br \quad (3-10)$$

dimana,

$|B_i|$ = Magnitud dari arus cabang i th.

R = Resistansi arus cabang ke i .

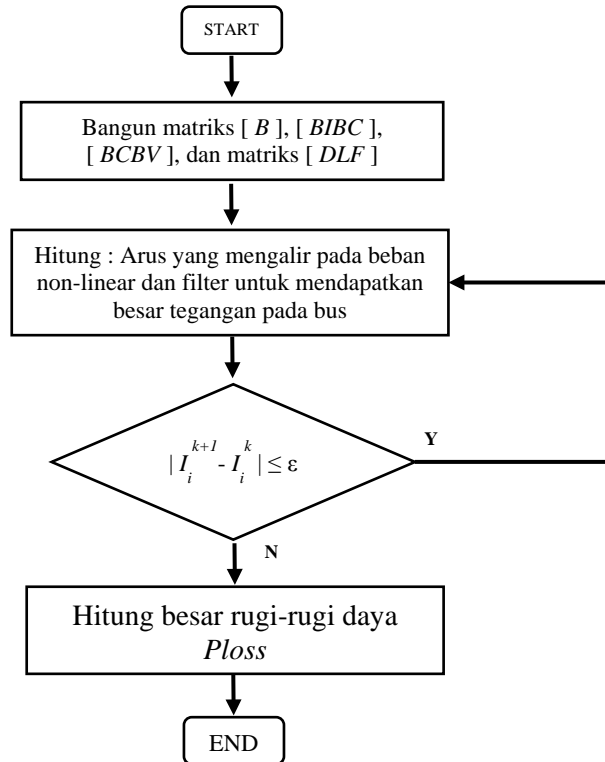
br = Jumlah cabang pada RDS.

Total rugi-rugi daya juga dapat ditulis:

$$P_{loss} = [R]^T [BIBC][I]^2 \quad (3-11)$$

3.1.3 Flowchart algoritma backward-forward pada RDS

Dari uraian persamaan aliran daya *backward-forward sweep* pada RDS diatas dapat digambarkan pada *flowchart* algoritma dibawah:

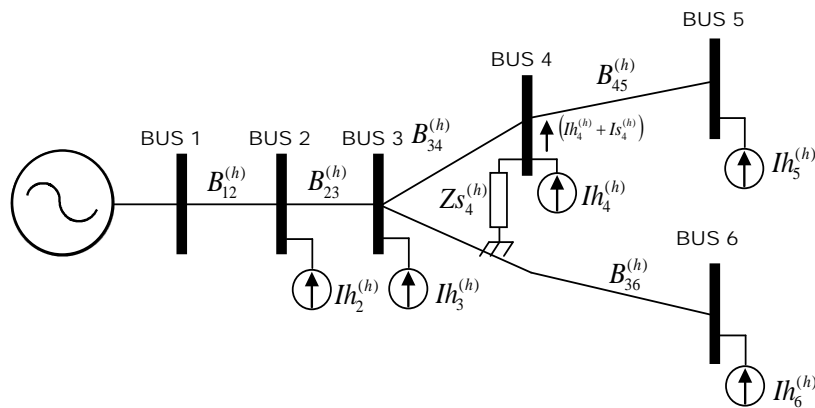


Gambar 3-2 Flowchart backward-forward sweep pada RDS.

3.2 Algoritma *harmonic load flow*(HLF)

Algoritma aliran daya harmonik (HLF) juga dikembangkan oleh Teng (Teng J. H., 2007). Teknik *backward-forward* juga digunakan disini akan tetapi juga mempertimbangkan adanya harmonisa. Dalam penelitian ini, sumber harmonisa yang digunakan adalah orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 dan ke-17. Sumber harmonisa ditempatkan pada beberapa bus pada RDS.

Algoritma *backward sweep* pada HLF digunakan untuk mendapatkan matriks $[A]$ yang mewakili hubungan antara arus cabang dan arus injeksi bus untuk urutan harmonik ke- h . Sedangkan *forward sweep* menghasilkan matriks $[HA]$ yang mewakili hubungan antara tegangan bus harmonik dan arus injeksi harmonik bus. Untuk lebih jelasnya, algoritma aliran daya harmonik, n -bus RDS ditunjukkan pada *single-line diagram* sebagai berikut:



Gambar 3-3 *Single line diagram distorted RDS 6-bus.*

Pada Gambar (3-2), bus 1 diasumsikan sebagai generator dan dianggap sebagai *slackbus* dengan 5 beban. Arus harmonik ke- h yang disumbangkan oleh beban non-linier dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$[Ih^{(h)}] = [Ih_2^{(h)} Ih_3^{(h)} Ih_4^{(h)} Ih_5^{(h)} Ih_6^{(h)}] \quad (3-12)$$

Arus harmonik diserap oleh filter yang terhubung pada bus 4 seperti terlihat pada Gambar (3-2) adalah:

$$[Is^{(h)}] = [Is_4^{(h)}] \quad (3-13)$$

Perlu dicatat bahwa vektor arus harmonik dari filter mengandung satu elemen yaitu arus harmonisa yang diserap oleh filter pada bus 4. Jika jumlah filter yang terhubung pada RDS sama dengan nl maka dimensi vektor arus harmonik dari filter adalah $(nl \times 1)$. Sehingga vektor arus bus harmonik ke- h adalah:

$$[I^{(h)}] = \begin{bmatrix} Ih^{(h)} \\ \vdots \\ Is^{(h)} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

3.2.1 Backward sweep HLF

Untuk mendapatkan nilai arus yang mengalir pada cabang, KCL digunakan pada *backward sweep* arus, sehingga :

$$B_{36}^{(h)} = Ih_6^{(h)}$$

$$B_{45}^{(h)} = Ih_5^{(h)}$$

$$B_{34}^{(h)} = Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Is_4^{(h)}$$

$$B_{23}^{(h)} = Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} + Is_4^{(h)}$$

$$B_{12}^{(h)} = Ih_2^{(h)} + Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} + Is_4^{(h)}$$

Atau dalam bentuk matrik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_{12}^{(h)} \\ B_{23}^{(h)} \\ B_{34}^{(h)} \\ B_{45}^{(h)} \\ B_{36}^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \\ Ih_3^{(h)} \\ Ih_4^{(h)} \\ Ih_5^{(h)} \\ Ih_6^{(h)} \\ Is_4^{(h)} \end{bmatrix}$$

$$[B^{(h)}] = [A^{(h)}][I^{(h)}] \quad (3-15)$$

dimana,

$[A^{(h)}]$ =Matrik hubungan antara arus injeksi bus dengan arus cabang yang mengalir pada harmonisa ke- h .

Arus cabang yang mengalir antara bus i-j adalah:

$$[B_{ij}^{(h)}] = [A_{ij}^{(h)}]^T [I^{(h)}] \quad (3-16)$$

dimana,

$[A_{ij}^{(h)}]$ = Koefisien vektor dari cabang (i-j) terhadap adanya arus harmonik pada beban yang mengalir melewati cabang (i-j), yaitu:

$$[A_{ij}^{(h)}] = \begin{bmatrix} Ah_{ij}^{(h)} \\ \vdots \\ As_{ij}^{(h)} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

dimana,

$[As_{ij}^{(h)}]$ = Koefisien vektor dari cabang (i-j) terhadap adanya arus harmonik yang diserap oleh filter.

Persamaan (3-17) diatas dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$[A_{12}^{(h)}] = [Ah_{12}^{(h)} \dots As_{12}^{(h)}] = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$[A_{23}^{(h)}] = [Ah_{23}^{(h)} \dots As_{23}^{(h)}] = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$[A_{34}^{(h)}] = [Ah_{34}^{(h)} \dots As_{34}^{(h)}] = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 1]$$

$$[A_{45}^{(h)}] = [Ah_{45}^{(h)} \dots As_{45}^{(h)}] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$[A_{36}^{(h)}] = [Ah_{36}^{(h)} \dots As_{36}^{(h)}] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

Sedangkan besar *drop* tegangan cabang (1-2) pada konteks arus dan impedansi harmonisa ke-*h* adalah:

$$\Delta V_{12}^{(h)} = Z_{12}^{(h)} B_{12}^{(h)} \quad (3-18)$$

Persamaan (3-18) diatas dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\Delta V_{12}^{(h)} = Z_{12}^{(h)} [A_{12}^{(h)}] [I^{(h)}] = Z_{12}^{(h)} (Ih_2^{(h)} + Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} + Is_4^{(h)})$$

Demikian juga dengan *drop* tegangan pada cabang yang lain:

$$\Delta V_{23}^{(h)} = Z_{23}^{(h)} [A_{23}^{(h)}] [I^{(h)}] = Z_{23}^{(h)} (Ih_3^{(h)} + Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Ih_6^{(h)} + Is_4^{(h)})$$

$$\Delta V_{34}^{(h)} = Z_{34}^{(h)} [A_{34}^{(h)}] [I^{(h)}] = Z_{34}^{(h)} (Ih_4^{(h)} + Ih_5^{(h)} + Is_4^{(h)})$$

$$\Delta V_{45}^{(h)} = Z_{45}^{(h)} [A_{45}^{(h)}] [I^{(h)}] = Z_{45}^{(h)} (Ih_5^{(h)})$$

$$\Delta V_{36}^{(h)} = Z_{36}^{(h)} [A_{36}^{(h)}] [I^{(h)}] = Z_{36}^{(h)} (Ih_6^{(h)})$$

3.2.2 Forward sweep HLF

Untuk mendapatkan tegangan harmonik pada bus, digunakan *forward sweep* tegangan dan KVL sebagai berikut:

$$V_2^{(h)} = V_1^{(h)} - \Delta V_{12}^{(h)} \quad (3-19)$$

dimana,

$V_1^{(h)}$ = Tegangan *slack bus* pada harmonisa ke- h .

Besar tegangan *slack/swing bus* pada harmonisa ke- h adalah nol karena di asumsikan generator mensuplai tegangan sinusoidal murni. Oleh karena itu:

$$V_2^{(h)} = Z_{12}^{(h)} Ih_2^{(h)} + Z_{12}^{(h)} Ih_3^{(h)} + Z_{12}^{(h)} Ih_4^{(h)} + Z_{12}^{(h)} Ih_5^{(h)} + Z_{12}^{(h)} Ih_6^{(h)} + Z_{12}^{(h)} Is_4^{(h)}$$

Begitu juga untuk tegangan pada bus yang lain, sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$[V^{(h)}] = [HA^{(h)}] [I^{(h)}] \quad (3-20)$$

Matriks $[HA]$ pada contoh distorted RDS 6-bus diatas adalah:

$$\begin{bmatrix} Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} + Z_{45}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} \\ Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} + Z_{45}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{36}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} \end{bmatrix}$$

dimana,

$[HA]$ = Matrik relasi antara tegangan harmonisa bus dengan arus harmonisa

Sedangkan besar tegangan harmonisa pada filter adalah sebagai berikut:

$$[V_s^{(h)}] = [HA_s^{(h)}] [I^{(h)}] \quad (3-21)$$

dimana,

$[HA_s^{(h)}]$ = Vektor baris dari matriks $[HA]$ yang berhubungan dengan filter.

Sehingga matriks $[HA_s^{(h)}]$ pada contoh *distorted* RDS 6-bus diatas adalah:

$$[HA_s^{(h)}] = \begin{bmatrix} Z_{12}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} & Z_{12}^{(h)} + Z_{23}^{(h)} + Z_{34}^{(h)} \end{bmatrix}$$

Jika jumlah filter yang terhubung pada RDS sama dengan nl maka dimensi vektor $[HA_s^{(h)}]$ adalah $(nl \times I^{(h)})$. Besar tegangan harmonisa ke- h filter pada bus 4 dalam kaitannya dengan impedansi harmonisanya adalah:

$$V_{s4}^{(h)} = -I_{s4}^{(h)} \times Z_{s4}^{(h)} \quad (3-22)$$

dimana,

$I_{s4}^{(h)}$ = Arus harmonisa ke- h dari filter yang terpasang pada bus 4.

$Z_{s4}^{(h)}$ = Impedansi harmonisa ke- h dari filter yang terpasang pada bus 4.

Dengan melakukan substitusi persamaan (3-21) dengan (3-22) maka:

$$-I_{s4}^{(h)} \times Z_{s4}^{(h)} = [HA_s^{(h)}] \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \\ \vdots \\ Is_4^{(h)} \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

dimana,

$Ih^{(h)}$ = Vektor arus harmonisa ke- h pada beban

$Is^{(h)}$ = Vektor arus harmonisa ke- h pada filter

Jika diasumsikan RDS mempunyai $(n-1)$ beban dan sebuah filter yang terpasang pada bus i , maka:

$$-I_{si}^{(h)} \times Z_{si}^{(h)} = [HA_s^{(h)}] [Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \dots Is_i^{(h)}]^T \quad (3-24)$$

Perlu dicatat bahwa elemen matrik $[HA_s^{(h)}]$ dengan $(n-1)$ kolom, terdiri dari beberapa elemen yang terhubung arus harmonisa beban dan sebuah elemen

yang terhubung dengan arus harmonisa filter yang terpasang pada bus i . Sehingga dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} HA_s^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} & \vdots & HA_{ss}^{(h)} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

Substitusi persamaan (3-24) dengan (3-25), menjadi:

$$\begin{aligned} -Is_i^{(h)} \times Zs_i^{(h)} &= \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} & \vdots & HA_{ss}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \dots Is_i^{(h)} \end{bmatrix}^T \\ -Is_i^{(h)} \times Zs_i^{(h)} &= \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} HA_{ss}^{(h)} \end{bmatrix} \times Is_i^{(h)} \\ \left(\begin{bmatrix} HA_{ss}^{(h)} \end{bmatrix} + Zs_i^{(h)} \right) Is_i^{(h)} &= \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai $Is_i^{(h)}$, maka:

$$Is_i^{(h)} = \left(\begin{bmatrix} HA_{ss}^{(h)} \end{bmatrix} + Zs_i^{(h)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \end{bmatrix}^T$$

Atau dapat ditulis:

$$Is_i^{(h)} = \begin{bmatrix} HLF^{(h)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \end{bmatrix}^T$$

Jika jumlah filter yang dipasang pada RDS sejumlah nl , maka dimensi dari matrik $\begin{bmatrix} HLF^{(h)} \end{bmatrix}$ adalah $(nl \times nl)$:

$$\begin{bmatrix} Is_i^{(h)} \end{bmatrix}_{nl \times 1} = \begin{bmatrix} HLF^{(h)} \end{bmatrix}_{nl \times nl}^{-1} \begin{bmatrix} HA_{sh}^{(h)} \end{bmatrix}_{nl \times (n-1)} \begin{bmatrix} Ih_2^{(h)} \dots Ih_{i-1}^{(h)} Ih_i^{(h)} Ih_{i+1}^{(h)} \dots Ih_n^{(h)} \end{bmatrix}_{n \times 1}^T \quad (3-26)$$

Dimana,

$$\begin{bmatrix} Is_i^{(h)} \end{bmatrix}_{nl \times 1} = \text{Vektor arus harmonisa dari sejumlah } nl \text{ filter.}$$

Setelah besar arus harmonisa yang diserap oleh filter didapat, arus harmonisa cabang dan tegangan bus dapat diketahui dengan menggunakan *backward sweep* menggunakan persamaan (3-16) dan *forward sweep* dengan menggunakan persamaan (3-20). Nilai tegangan harmonisa pada bus dihitung dengan iterasi kurang dari atau sama dengan toleransi yang ditentukan ε .

$$\left| V_i^{(h),k+1} - V_i^{(h),k} \right| \leq \varepsilon \quad (3-27)$$

dimana,

$V_i^{(h),k+1}$ = Besar tegangan harmonisa ke- h pada bus i , pada iterasi ke $k+1$.

$V_i^{(h),k}$ = Besar tegangan harmonisa ke- h pada bus i , pada iterasi ke k .

Besar rugi-rugi daya total pada harmonisa ke- h didefinisikan oleh:

$$P_{loss}^{(h)} = \sum_{i=1}^{br} P_{loss_i}^{(h)} = \sum_{i=1}^{br} \sum_{h=h_0}^{h_{max}} |B_i^{(h)}|^2 \cdot R_i^{(h)} \quad (3-28)$$

dimana,

h_0 = Urutan harmonisa terkecil.

h_{max} = Urutan harmonisa terbesar.

$|B_i^{(h)}|$ = Magnitud dari arus cabang ke i .

$R_i^{(h)}$ = Resistansi arus cabang ke i .

Total rugi-rugi daya juga dapat ditulis dalam bentuk vektor sebagai berikut:

$$P_{loss}^{(h)} = [R^{(h)}]^T [A^{(h)}] [I^{(h)}]^T \quad (3-29)$$

Nilai tegangan rms bus i (V_{rms_i}) dan THD dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_{rms_i} = \sqrt{|V_i^{(1)}|^2 + \sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2} \quad (3-30)$$

Sehingga besar *total harmonic distortion* (THD) dapat dihitung sebagai berikut:

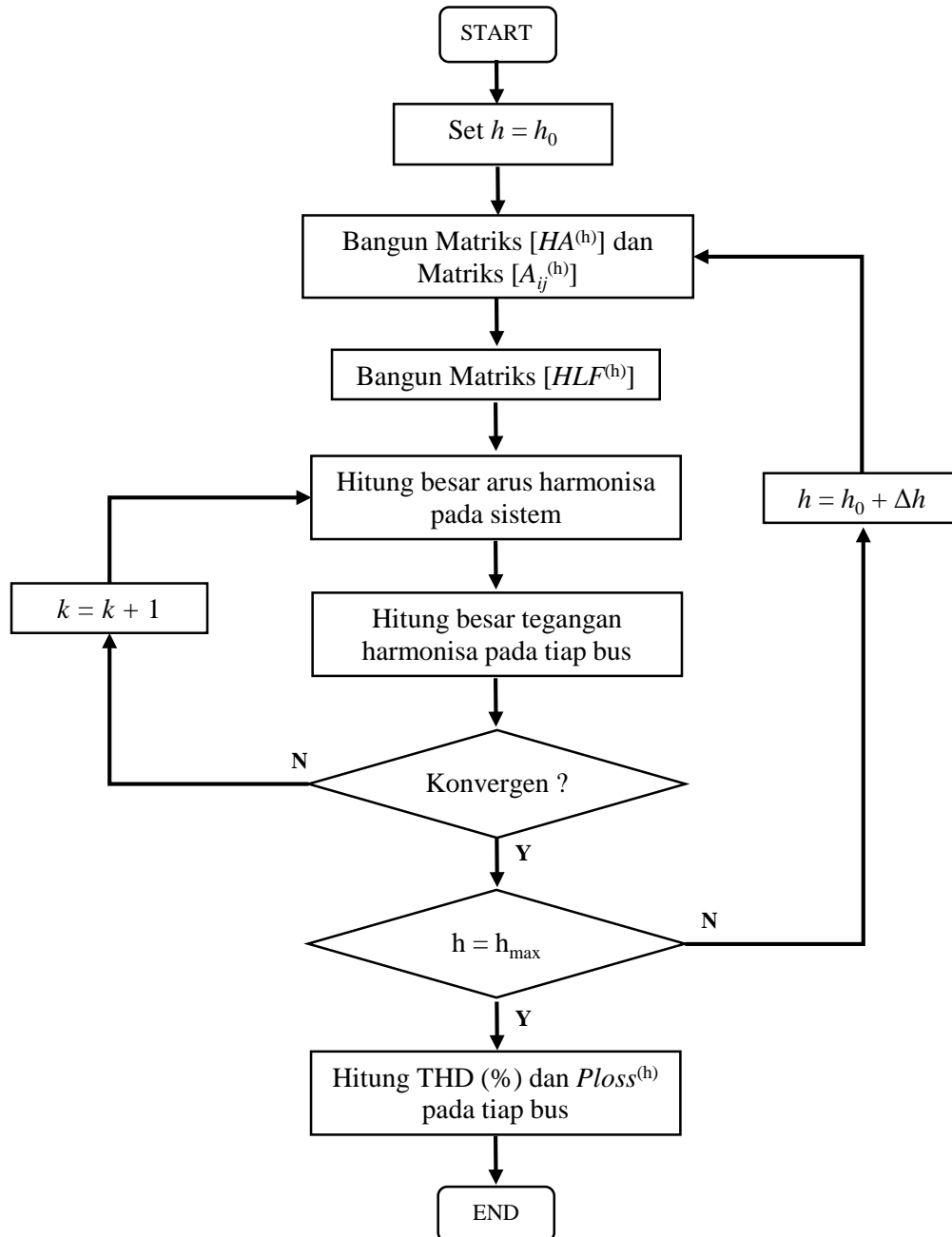
$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2}}{|V_i^{(1)}|^2} \quad (3-31)$$

dimana,

$|V_i^{(1)}|$ = Besar tegangan absolut pada frekuensi fundamental

3.2.3 Flowchart algoritma HLF

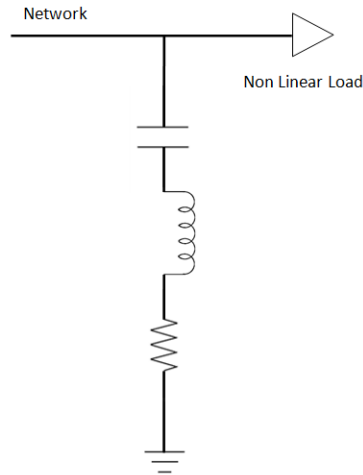
Dari uraian persamaan aliran daya harmonisa (HLF) *backward-forward sweep* pada *distorted* RDS dengan mempertimbangkan adanya filter pasif diatas dapat digambarkan pada *flowchart* algoritma berikut:



Gambar 3-4 Flowchart harmonic load flow (HLF) backward-forward sweep dengan mempertimbangkan adanya filter pasif.

3.3 Perancangan *single tuned filter*

Pada penelitian ini jenis desain filter pasif yang digunakan adalah *single tuned filter*. Filter pasif ini digunakan pada sistem berdasarkan hasil perhitungan aliran daya harmonisa HLF yang terjadi pada tiap bus. Berikut ditunjukkan gambar rangkaian dari filter *single tuned*:



Gambar 3-5 *Single tuned filter* pada *network*.

Berikut adalah langkah dalam merancang filter harmonisa pasif *single-tuned* pada sistem distribusi radial (RDS):

- Step 1 : Mendapatkan nilai dari reaktansi kapasitor X_c dan kapasitansi C pada frekuensi fundamental:

$$X_c = \frac{V^2}{Q_{fil}} \quad (3-32)$$

dimana, Q_{fil} adalah injeksi daya reaktif dari filter, V adalah tegangan bus.

Dan selanjutnya nilai C dapat dihitung dengan:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (3-33)$$

dimana, f adalah frekuensi fundamental.

- Step 2 : Mendapatkan nilai dari induktansi L dan reaktansi induktif X_l pada frekuensi tuning:

$$L = \frac{1}{C(2\pi f_{tun})^2} \quad (3-34)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (3-35)$$

dimana, f_{tun} adalah frekuensi tuning dari *single tuned* filter.

- Step 3: Hitung nilai resistansi R untuk kualitas faktor Q , sebagai berikut:

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (3-36)$$

dimana, $X_n = \sqrt{X_C X_L} = \sqrt{\frac{L}{C}}$, dan $30 \leq Q \leq 150$.

Dari tahapan desain filter *single tuned* diatas maka akan didapatkan impedansi dari filter sebesar:

$$\begin{aligned} Z_{fil} &= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \\ Z_{fil} &= R + j(X_L - X_C) \end{aligned} \quad (3-37)$$

Sehingga pada frekuensi harmonik ke- h impedansi dari filter *single tuned* adalah:

$$Z_{fil}^{(h)} = R^{(h)} + j(X_L^{(h)} - X_C^{(h)}) \quad (3-38)$$

3.4 Optimasi filter dengan *whale optimization algorithm* (WOA)

Algoritma WOA adalah salah satu algoritma optimasi yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan. Algoritma ini terinspirasi dari spesies *Humpback Whale* dalam menangkap mangsa. Teknik yang paling umum dikenal adalah teknik *bubble net*. Sekumpulan *whale* akan mengelilingi target mangsa sambil mengeluarkan *bubble*. Diameter keliling ini akan semakin lama semakin kecil untuk mempersempit ruang gerak target, dan *bubble* yang dikeluarkan akan menjadi jaring untuk menangkap mangsa. Kemudian salah satu *whale* akan berenang keatas melewati jaring *bubble* dan menangkap semua mangsa yang terjaring sebelumnya.

Dalam teknik optimasi filter *single tuned*, WOA digunakan untuk mendapatkan posisi bus terbaik serta ukuran dari filter *single tuned* Q_{fil} pada RDS pada *objective function* yang diberikan. Pada optimasi penempatan filter, bilangan *non linier integer* dalam bentuk variabel diskrit pada *constraint* jumlah bus digunakan untuk mendapatkan posisi optimum pada fungsi objektif yang diberikan. Pada penelitian ini optimasi fungsi objektif yang digunakan adalah untuk mendapatkan nilai minimum dari rugi-rugi daya total (fundamental dan harmonik).

3.4.1 Objective function

Pada dasarnya fungsi awal dari sebuah filter pasif *single tuned* adalah untuk meredam harmonisa atau untuk meminimalkan THD. Sedangkan optimasi penempatan dan ukuran dari filter pasif *single tuned* pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan total rugi-rugi daya minimum pada RDS yaitu sebagai berikut:

$$OF = P_{loss \min} = P_{loss}^1 + \sum_{h=h_0}^{h_{\max}} P_{loss}^{(h)} \quad (3-39)$$

dimana,

P_{loss}^1 = Rugi-rugi daya pada frekuensi fundamental.

$\Sigma P_{loss}^{(h)}$ = Total rugi-rugi daya pada frekuensi harmonik.

h_0 = Harmonisa awal.

h_{\max} = Harmonisa terakhir.

Untuk mendapatkan nilai rugi-rugi daya pada *distorted* RDS sebelum dan setelah pemasangan filter, pada frekuensi fundamental digunakan teknik aliran daya *backward-forward sweep* pada RDS yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1. Begitu juga dalam mendapatkan total dari rugi-rugi daya harmonik sebelum dan setelah pemasangan filter digunakan teknik aliran daya harmonisa HLF yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2.

3.4.2 Equality dan Inequality constraint

Untuk mendapatkan nilai optimum dari fungsi objektif yang diberikan, maka besar tegangan efektif dan besar THD dijaga pada batasan aman. Oleh karena itu fungsi optimasi memerlukan *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* pada penelitian ini digunakan pada batasan ketidak-linieran perhitungan aliran daya yang digunakan. *Inequality constraint* digunakan pada batasan besar tegangan efektif, THD, serta besar daya reaktif yang diinjeksikan oleh filter pada RDS. Batasan yang digunakan pada fungsi objektif adalah sebagai berikut:

1. Tegangan bus, $V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max}$

Untuk menghindari *over voltage* maupun *under voltage* maka tegangan pada tiap bus dijaga kurang dari V_{\max} dan lebih dari V_{\min} .

2. Total Harmonic Distortion (THD), $\text{THD}_{\text{bus}}(\%) \leq \text{THD}_{\max}$

THD setelah pemasangan filter haruslah lebih kecil dari pada besar THD sebelum pemasangan filter. Dan besar THD harus lebih kecil dari THD maksimum/standar toleransi THD.

3. Injeksi daya reaktif filter, $Q_{\text{fil}} \leq Q_{\max}$

Total daya reaktif yang diinjeksikan oleh filter memenuhi batasan maksimum. Nilai maksimum daya reaktif didapatkan dengan melakukan aliran daya dan aliran daya harmonisa HLF tanpa adanya filter (Eajal, El-Hawary, 2010).

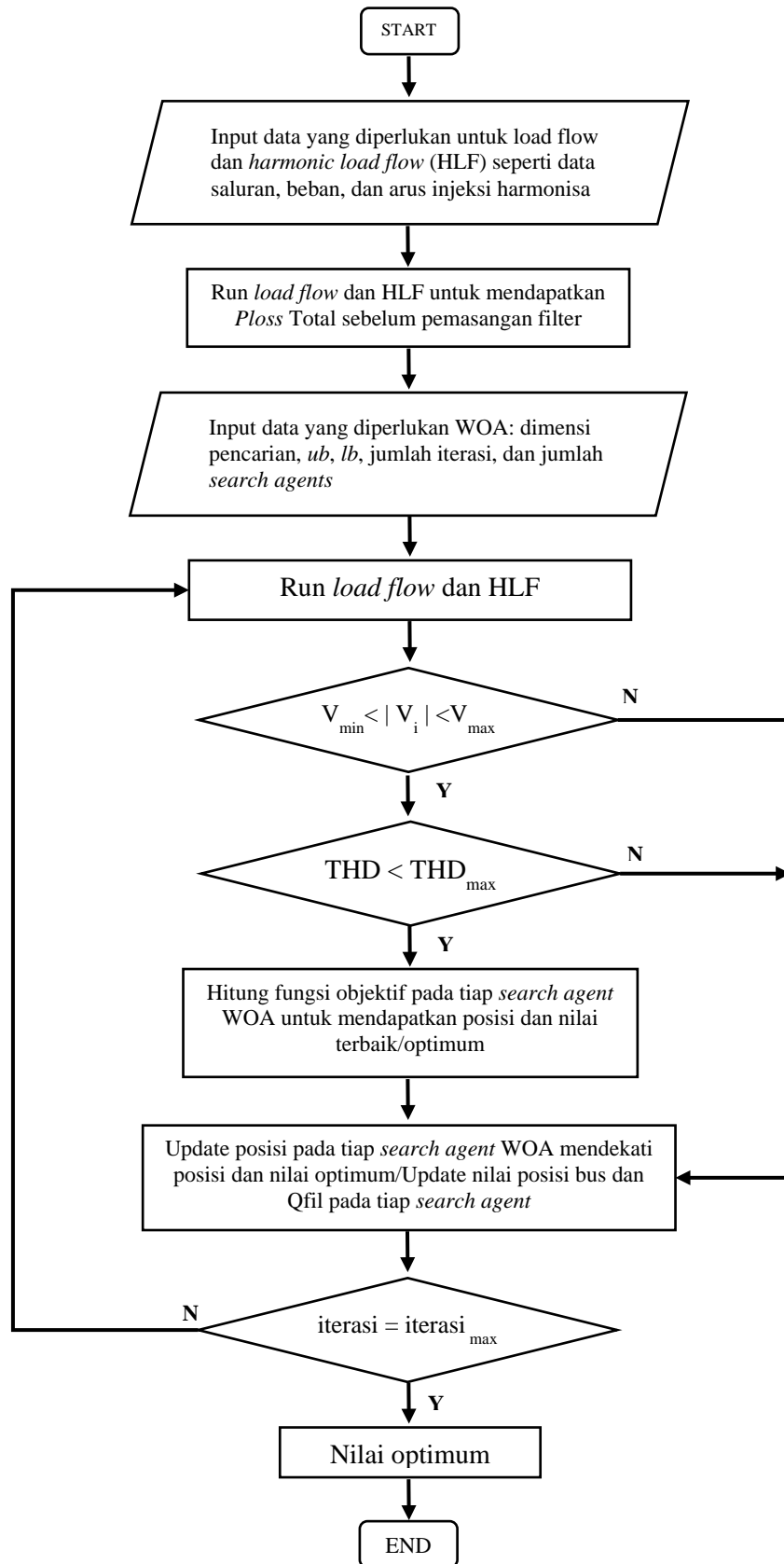
3.4.3 Strategi optimasi menggunakan WOA

Optimasi WOA pada penelitian ini didasarkan pada perhitungan aliran daya *backward-forward* pada RDS dan HLF dengan mempertimbangkan adanya filter untuk mendapatkan nilai dan posisi optimum dari filter pada RDS. Berikut adalah langkah strategi dalam optimasi WOA:

1. Rugi-rugi daya fundamental dan harmonik awal sebelum pemasangan filter didapatkan dari aliran daya *backward-forward sweep* dan *harmonic load flow*. Total rugi-rugi daya ini dianggap sebagai rugi-rugi daya maksimum.

2. Beberapa data yang dibutuhkan oleh algoritma WOA antara lain adalah dimensi, jumlah *search agent*, batas maksimum dan batas minimum pada tiap dimensi pencarian, dan jumlah iterasi.
3. *Standard test system* yang digunakan pada penelitian ini, jumlah dimensi pencarian adalah dua, yaitu untuk mencari ukuran dari filter dan untuk mendapatkan posisi bus optimum dari fungsi objektif yang telah ditentukan. Jumlah *search agent*/agen pencari pada sistem 13-bus ini dianggap separuh dari jumlah bus, hal ini bertujuan untuk mengerucutkan pencarian posisi bus optimum. Batas maksimum filter yaitu batas maksimum dari Q_{\max} , sedangkan batasan minimum adalah sebelum pemasangan filter yaitu 0. Batas maksimum dari posisi bus adalah 13 dan batas minimum dari posisi bus adalah 2. Jumlah iterasi yang digunakan pada penelitian ini sebesar 500 iterasi.
4. Fungsi objektif pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan total rugi-rugi daya minimum dari RDS. Oleh karena itu hasil rugi-rugi daya fundamental dari aliran daya *backward forward* akan dijumlahkan dengan rugi-rugi daya harmonik aliran daya harmonisa HLF sehingga didapatkan rugi-rugi daya total pada tiap agen pencari.
5. Tiap agen pencari akan bergerak mendekati nilai optimum, sehingga posisi (dalam hal ini ukuran dan posisi bus) akan berubah mendekati posisi optimum yang didapat pada iterasi ke t .
6. Dengan mengulangi proses 5 sampai dengan iterasi maksimum maka semua agen pencari pada iterasi *max* akan berada di posisi yang sama atau mendekati dari posisi optimum.

Strategi optimasi *single tuned* filter dengan WOA diatas dapat digambarkan dengan *flowchart* sebagai berikut:



Gambar 3-6 Flowchart strategi optimasi filter dengan menggunakan WOA.

3.5 Data *standard test system*

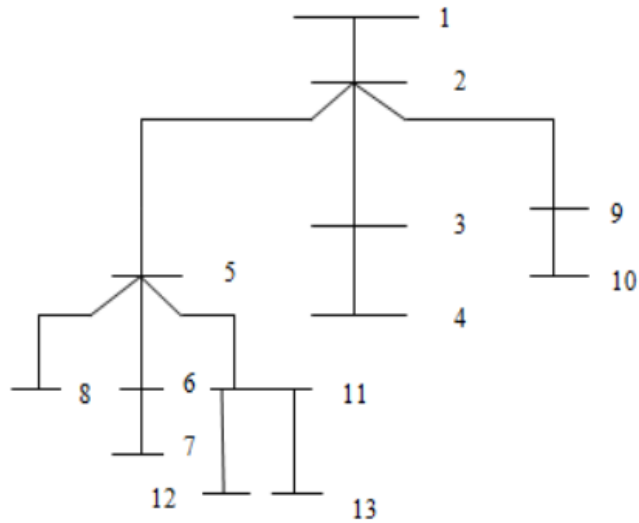
Pada penelitian ini digunakan *standard test system* IEEE 13-bus. Data saluran dari *standard test system* 13-bus ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3-1 Data saluran *standard test system* 13-bus.

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)
1	2	0,117	0,048
2	3	0,107	0,044
3	4	0,165	0,046
2	5	0,150	0,042
5	6	0,150	0,042
6	7	0,314	0,054
5	8	0,210	0,036
2	9	0,314	0,054
9	10	0,210	0,036
5	11	0,131	0,023
11	12	0,105	0,018
11	13	0,157	0,027

Tabel 3-2 Data beban *standard test system* 13-bus.

Bus	P (KW)	Q (KVAR)
2	100	30
3	20	730
4	150	225
5	50	10
6	120	540
7	40	700
8	75	90
9	50	150
10	125	825
11	210	800
12	80	300
13	95	30



Gambar 3-7 *Single line diagram standard test system 13-bus.*

Sedangkan arus harmonisa akan ditempatkan pada Bus 3, 5, 9, 10, 12, dan bus 13. Besar injeksi arus harmonisa ditunjukkan pada tabel dibawah:

Tabel 3-3 Injeksi arus harmonisa pada beban.

Orde	Magnitudo (%)	Sudut
5	98	140
7	39,86	113
11	18,95	-158
13	8,79	-178
17	2,5	-94

Proses perhitungan arus injeksi dilakukan per-orde harmonisa. Nilai injeksi harmonisa pada Tabel 3-3 akan dikali dengan $I_{fundamental}$ untuk memperoleh arus yang terdistorsi disetiap bus.

$$[I^5] = \begin{bmatrix} I_{h1fund} \times 0,098 \angle 140 \\ I_{h2fund} \times 0,098 \angle 140 \\ I_{h3fund} \times 0,098 \angle 140 \\ I_{h4fund} \times 0,098 \angle 140 \\ I_{h5fund} \times 0,098 \angle 140 \end{bmatrix} \text{ dst.}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini akan ditunjukkan hasil simulasi dari metodologi penelitian optimasi penempatan dan kapasitas filter pasif *single tuned* pada *standard test system* RDS dengan menggunakan WOA. Pada bagian ini akan dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya: aliran daya *backward-forward sweep* pada RDS, aliran daya harmonisa HLF, serta strategi optimasi menggunakan WOA.

4.1 Aliran daya *backward-forward sweep* dan aliran daya harmonisa HLF

Data dari saluran dan beban *standard test system* 13-bus ditunjukkan pada Tabel 3-1 dan 3-2 pada bab metodologi. *Single line diagram* dari RDS telah ditunjukkan pada Gambar 3-7. Setelah semua data didapatkan, maka aliran daya *backward-forward sweep* dapat dilakukan untuk mendapatkan besar nilai tegangan, THD, dan rugi-rugi daya pada frekuensi fundamental. Langkah dari hasil simulasi aliran daya *backward-forward* dan HLF akan dijelaskan pada sub bab ini.

4.1.1 Aliran daya *backward-forward sweep*

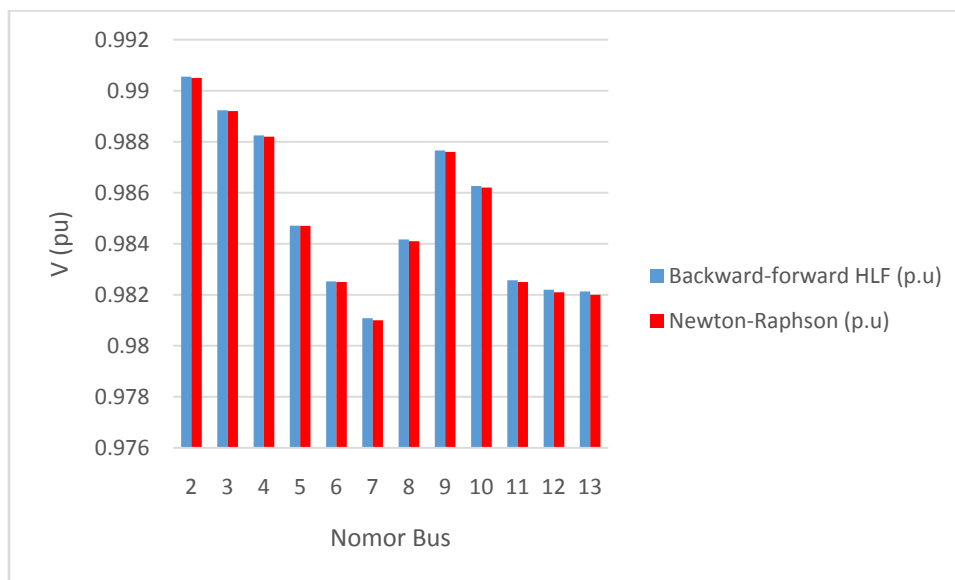
Berikut ditunjukkan hasil simulasi berdasarkan metodologi aliran daya *backward-forward sweep* sebelum pemasangan *test single tuned filter* dan hasil simulasi setelah pemasangan filter untuk dibandingkan dengan perhitungan *Newton-Raphson* menggunakan *software* ETAP untuk menguji tingkat keakuratan perhitungan.

a. Sebelum pemasangan filter

Pada bagian ini simulasi aliran daya pada *distorted standard test system* RDS 13-bus dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan dan rugi-rugi daya dari sistem. Tabel 4-1 menunjukkan perbandingan hasil simulasi metodologi dengan metode *Newton-Raphson* dalam satuan pu.

Tabel 4-1 Perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental sebelum pemasangan filter.

Bus	Backward-forward	Newton-Raphson
2	0,990067	0,99003
3	0,98837	0,98833
4	0,987382	0,98734
5	0,984179	0,98411
6	0,981994	0,98193
7	0,980548	0,98048
8	0,983642	0,98358
9	0,986965	0,98688
10	0,985377	0,98527
11	0,982008	0,98192
12	0,981617	0,98153
13	0,981563	0,98147



Gambar 4-1 Grafik perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental sebelum pemasangan filter.

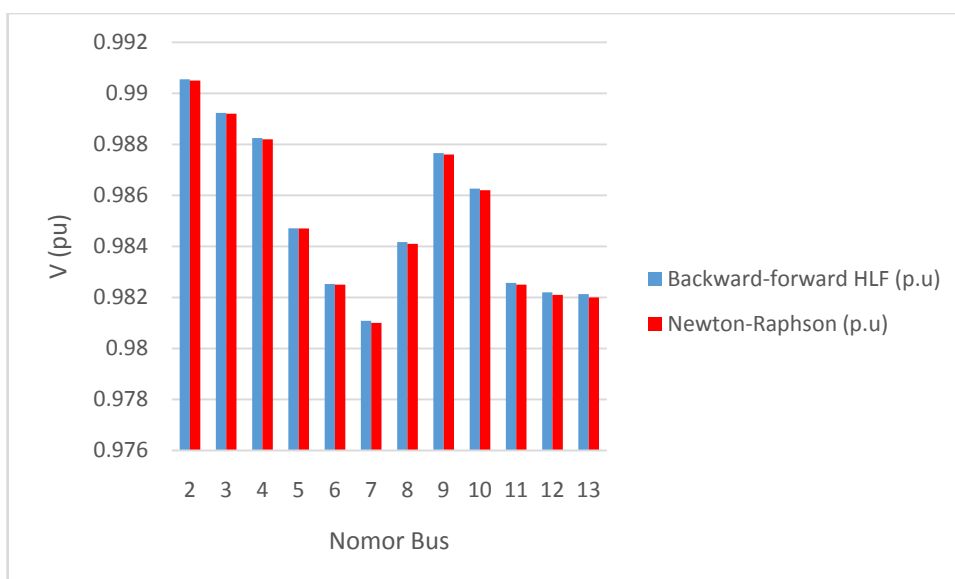
Dari Tabel 4-1 dan Gambar 4-1 didapatkan prosentase perhitungan tegangan fundamental *error* rata-rata sebesar 0,01%, rugi-rugi daya pada perhitungan adalah sebesar 131,68 KW, dan rugi-rugi daya pada simulasi *Newton-Raphson* sebesar 131,9 KW. Dengan demikian prosentase perbedaan perhitungan rugi-rugi daya antara *backward-forward* dengan *Newton-Raphson* sebesar 0,17% atau 0,0017.

b. Setelah pemasangan filter

Pada bagian ini simulasi aliran daya pada *standard test system* RDS 13-bus dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan serta rugi-rugi daya dari sistem dengan memperhitungkan pemasangan *single tuned filter* pada bus 3 sebesar 300 KVAR. Pemasangan filter ini hanya sebagai percobaan untuk memvalidasi perhitungan aliran daya.

Tabel 4-2 Perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300KVAR.

Bus	Backward-forward	Newton-Raphson
2	0,990493	0,99046
3	0,98917	0,98914
4	0,988183	0,98816
5	0,984608	0,98455
6	0,982424	0,98237
7	0,980978	0,98092
8	0,984072	0,98401
9	0,987393	0,98732
10	0,985805	0,98571
11	0,982438	0,98236
12	0,982047	0,98196
13	0,981993	0,9819



Gambar 4-2 Grafik perbandingan nilai tegangan pada frekuensi fundamental setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.

Berdasarkan Tabel 4-2 dan Gambar 4-2 diatas didapatkan prosentase perhitungan tegangan fundamental *error* rata-rata sebesar 0,13%.

Total rugi-rugi daya pada perhitungan *backward-forward sweep* adalah sebesar 121,53 KW dan rugi-rugi daya pada simulasi dengan metode *Newton-Raphson* sebesar 121,5 KW. Dengan demikian prosentase perbedaan perhitungan rugi-rugi daya fundamental antara *backward-forward* dengan *Newton-Raphson* sebesar 0,02%.

4.1.2 Aliran daya harmonisa HLF

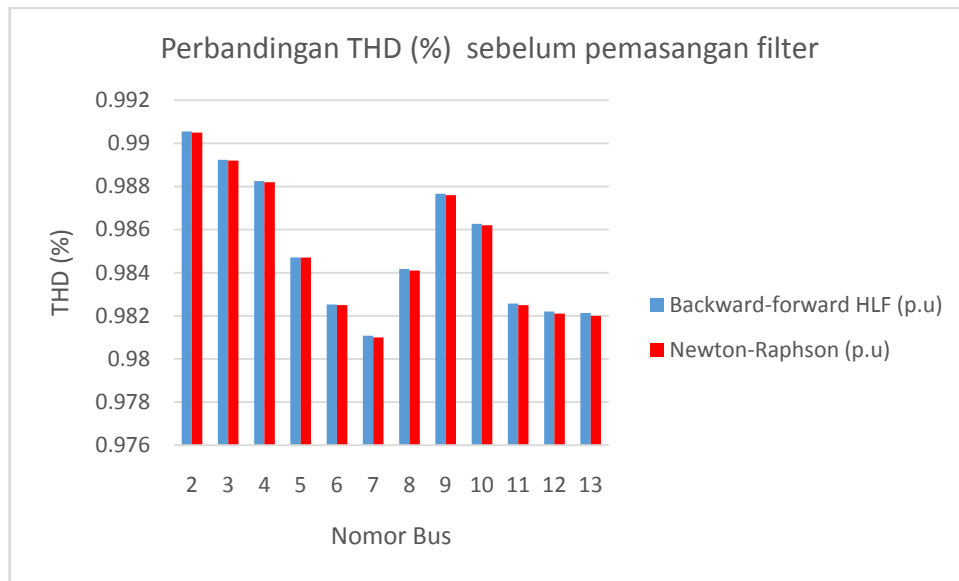
Berikut ditunjukkan hasil simulasi berdasarkan metodologi aliran daya harmonisa *backward-forward sweep* HLF sebelum pemasangan test *single tuned* filter dan hasil dari simulasi setelah pemasangan filter untuk dibandingkan dengan *Newton-Raphson* untuk menguji tingkat keakuratan perhitungan.

a. Sebelum pemasangan filter

Pada bagian ini simulasi aliran daya harmonisa pada *distorted standard test system* RDS 13-bus dilakukan untuk mendapatkan besar tegangan rms, THD, serta rugi-rugi daya dari sistem. Tabel 4-3 menunjukkan perbandingan hasil simulasi metodologi dengan *Newton-Raphson* dalam satuan %.

Tabel 4-3 Perbandingan THD (%) *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* sebelum pemasangan filter.

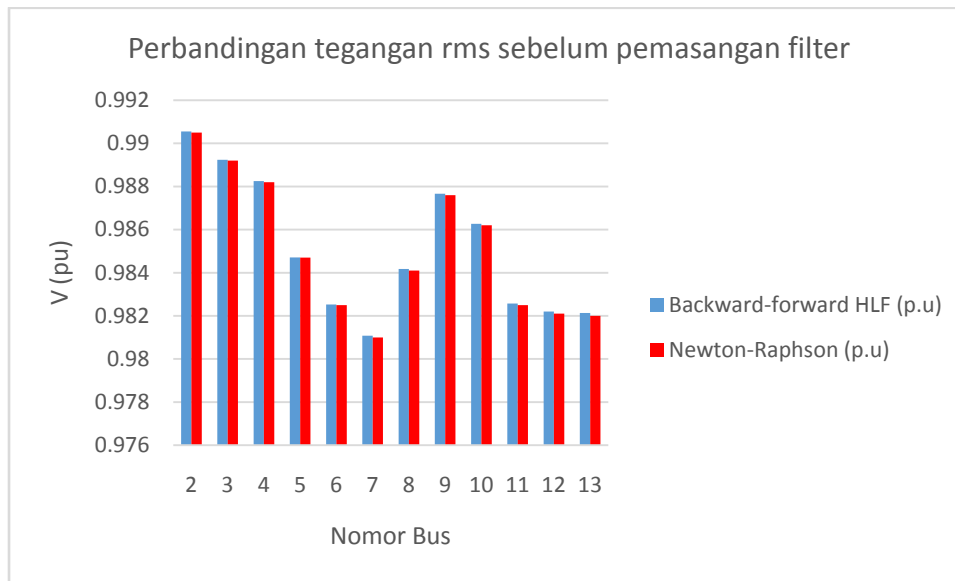
Bus	Backward-forward HLF (%)	Newton-Raphson(%)
2	1,92311	1,91
3	2,53296	2,36
4	2,53745	2,36
5	2,2925	2,23
6	2,30318	2,23
7	2,3106	2,23
8	2,29418	2,23
9	3,20867	3,2
10	3,94995	3,97
11	2,51226	2,44
12	2,64726	2,58
13	2,56793	2,48



Gambar 4-3 Grafik perbandingan THD (%) *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* sebelum pemasangan filter.

Tabel 4-4 Perbandingan tegangan rms *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* sebelum pemasangan filter.

Bus	Backward-forward HLF (p.u)	Newton-Raphson (p.u)
2	0,99025	0,9902
3	0,988687	0,9886
4	0,9877	0,9876
5	0,984437	0,9844
6	0,982254	0,9822
7	0,98081	0,9807
8	0,983901	0,9838
9	0,987473	0,9874
10	0,986145	0,9861
11	0,982318	0,9822
12	0,981961	0,9819
13	0,981886	0,9818



Gambar 4-4 Grafik perbandingan tegangan rms *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* sebelum pemasangan filter.

Dari Tabel 4-3 dan Gambar 4-3 didapatkan prosentase perhitungan THD 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 3,03% atau 0,0303. Sedangkan dari Tabel 4-4 dan Gambar 4-4 diatas didapatkan prosentase perhitungan tegangan rms 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 0,01% atau 0,0001. Hal ini menunjukkan aliran daya harmonisa HLF yang dirancang sangat baik karena memiliki rata-rata *error* yang kecil yaitu dibawah 5% atau 0,05.

Tabel 4-5 Rugi-rugi daya (*Ploss*) pada tiap orde harmonisa sebelum pemasangan filter.

Orde	<i>Ploss</i> (KW)
5	30,01
7	4,967
11	1,124
13	0,245
17	0,019
Total <i>Ploss</i>^(h)	36,364

Besar rugi daya harmonik dari HLF adalah sebesar 36,364 KW. Sehingga total rugi-rugi daya sebelum pemasangan filter adalah:

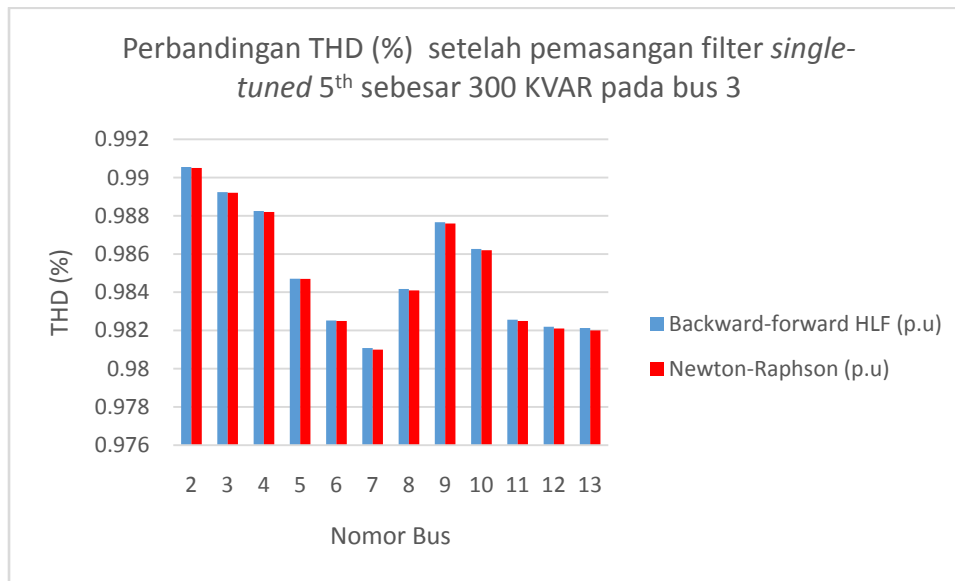
$$P_{loss} = P_{loss}^1 + \sum_{h=h0}^{h_{max}} P_{loss}^{(h)} = 131,68 + 36,364 = 168,05 \text{ KW}$$

b. Setelah pemasangan filter

Pada bagian ini simulasi aliran daya harmonisa *backward-forward* HLF pada *distorted standard test system* RDS 13-bus dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan rms, THD (%), serta rugi-rugi daya dari sistem dengan memperhitungkan pemasangan filter *single tuned* orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR. Pemasangan filter ini hanya sebagai percobaan untuk memvalidasi perhitungan aliran daya.

Tabel 4-6 Perbandingan THD (%) *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.

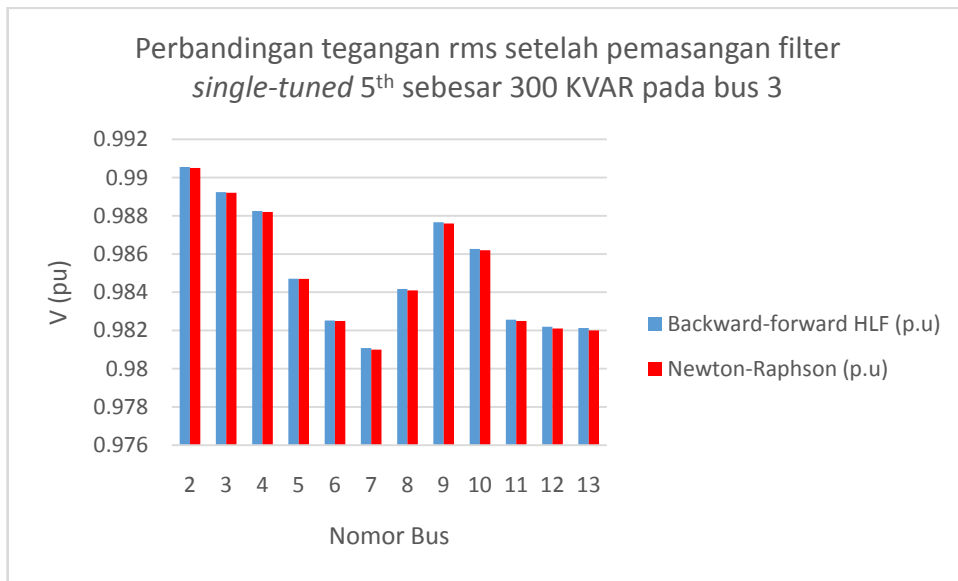
Bus	Backward-forward HLF (%)	Newton-Raphson (%)
2	1,090039	1,06
3	1,14813	1,11
4	1,150434	1,11
5	1,423961	1,39
6	1,431026	1,39
7	1,436009	1,39
8	1,425003	1,39
9	2,329529	2,32
10	3,066835	3,10
11	1,628235	1,55
12	1,75668	1,69
13	1,680082	1,59



Gambar 4-5 Grafik perbandingan THD (%) *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.

Tabel 4-7 Perbandingan tegangan rms *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.

Bus	Backward-forward HLF (p.u)	Newton-Raphson (p.u)
2	0,990552	0,9905
3	0,989236	0,9892
4	0,988249	0,9882
5	0,984708	0,9847
6	0,982524	0,9825
7	0,98108	0,9810
8	0,984171	0,9841
9	0,987661	0,9876
10	0,986268	0,9862
11	0,982568	0,9825
12	0,982199	0,9821
13	0,982131	0,9820



Gambar 4-6 Grafik perbandingan tegangan rms *backward-forward* HLF dengan *Newton-Raphson* setelah pemasangan filter orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR.

Dari Tabel 4-6 dan Gambar 4-5 didapatkan prosentase perhitungan THD 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 3 % atau 0,03. Dari Tabel 4-7 dan Gambar 4-6 diatas didapatkan prosentase perhitungan tegangan rms 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 0,01% atau 0,0001. Hal ini menunjukkan aliran daya harmonisa *backward-forward* HLF yang dirancang sangat baik karena memiliki rata-rata *error* yang kecil yaitu dibawah 5% atau 0,05.

Tabel 4-8 Rugi-rugi daya (*Ploss*) pada tiap orde harmonisa setelah pemasangan filter *single tuned* order ke-5 pada bus 3 sebesar 300KVAR.

Orde	<i>Ploss</i> (KW)
5	17,166
7	4,073
11	0,93
13	0,2
17	0,001
Total <i>Ploss</i>^(h)	22,386

Besar rugi daya harmonik total dari HLF adalah sebesar 22,386 KW. Sehingga total rugi-rugi daya setelah pemasangan filter *single tuned* orde ke-5 pada bus 3 sebesar 300 KVAR adalah:

$$P_{loss} = P_{loss}^1 + \sum_{h=h0}^{h_{max}} P_{loss}^{(h)} = 121,5 + 22,386 = 143,92 \text{ KW}$$

4.2 Optimasi filter pasif *single tuned* menggunakan WOA

Setelah melakukan validasi aliran daya *backward-forward sweep* RDS serta aliran daya harmonik HLF, selanjutnya dilakukan simulasi dan analisa untuk optimasi filter pasif *single tuned* pada jaringan distribusi radial 13-bus dengan menggunakan WOA. Pada sub bab ini akan dibagi menjadi dua bagian yaitu optimasi WOA untuk *single tuned* 5th dan optimasi WOA untuk *single tuned* 5th dan 7th yang dipasang *parallel* pada bus optimum.

4.2.1 Optimasi WOA filter *single tuned* 5th

Pada optimasi WOA *single tuned* 5th nilai inisial posisi bus akan diacak sebesar separuh dari jumlah total bus. Tahapan optimasi WOA untuk inialisasi posisi secara acak dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Nilai *losses* maksimum pada sistem adalah nilai *losses* total sebelum pemasangan filter. Dari hasil aliran daya *backward-forward sweep* RDS dan aliran daya harmonisa HLF pada sub bab sebelumnya didapatkan:
 - Besar rugi-rugi daya/*losses* fundamental = 131,68KW.
 - Besar rugi-rugi daya/*losses* harmonik = 36,364 KW.
 - Sehingga besar rugi-rugi daya aktif total = 168,05 KW.
 - THD rata-rata = 2,59 %.
2. Parameter pencarian nilai optimum adalah ukuran dari filter (KVAR) dan posisi/penempatan filter pada jaringan. Sehingga dimensi pencarian dari WOA adalah 2 dimensi. Jika posisi dinyatakan dengan (X,Y), dimana X adalah ukuran filter dan Y adalah posisi bus agen pencari *i* pada iterasi ke *t*, maka posisi optimum dari agen pencari *i* adalah (X*,Y*).

3. Batas atas (ub) dan batas bawah (lb) dari ukuran filter adalah $0 \leq Q_{fil} \leq Q_{max}$, dimana $ub = Q_{max}$ dan $lb = 0$. Besar nilai lb adalah 0 karena dianggap *losses* terbesar adalah pada saat sebelum pemasangan filter ($Q_{fil} = 0$). Sedangkan Q_{max} adalah total daya reaktif yang diserap oleh sistem (Eajal, El-Hawary, 2010). Nilai Q_{max} didapatkan dari simulasi aliran daya dan aliran daya harmonisa pada saat sebelum pemasangan filter pada jaringan.
4. Sedangkan batas atas (ub) dan batas bawah (lb) dari posisi filter adalah $2 \leq Bus \leq 13$. Dimana 2 adalah nilai *integer* minimum dan 13 adalah nilai bus *integer* maksimum dari RDS.
5. Pada strategi ini jumlah *whale* yang digunakan adalah separuh dari jumlah total bus. Hal ini ditujukan untuk mempersempit pencarian posisi optimum.
6. Sedangkan jumlah iterasi yang digunakan adalah 500.
7. Sehingga dari langkah 2 sampai dengan 6 diatas didapatkan:

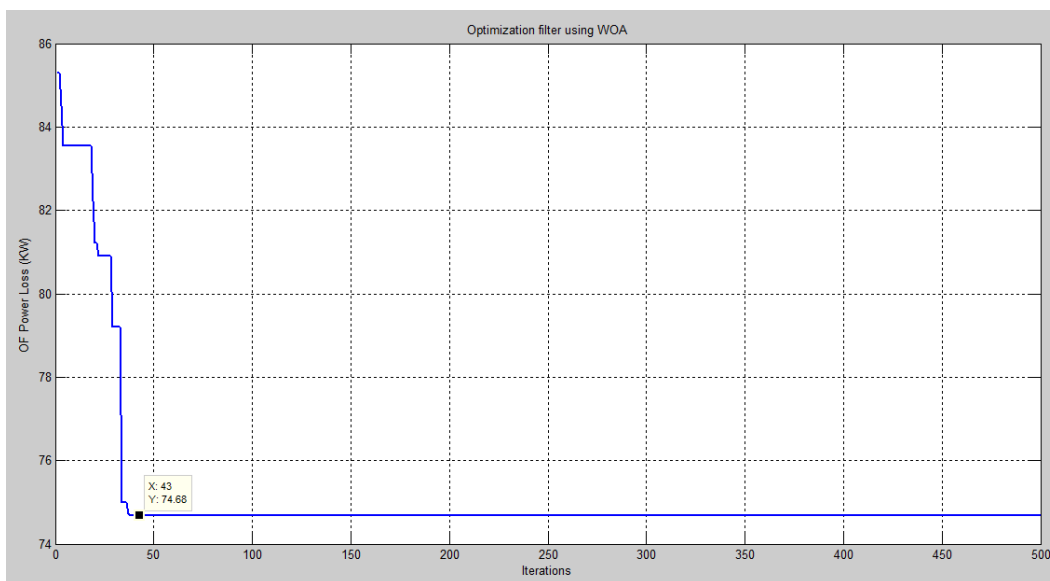
$ub = [Q_{max} \ 13];$
 $lb = [0 \ 2];$
 Jumlah *whale* = 5;
 Iterasi maksimum = 500;
 Dimensi pencarian = 2;

8. Strategi inialisasi posisi secara acak pada sub sub bab ini adalah mengacak nilai X dan Y (ukuran dan penempatan) sebagai berikut:
 - **Posisi (: , 1) = rand (posisi_i) * (ub_x - lb_x) + lb_x**
 - **Posisi (: , 2) = round (lb_y + (ub_y - lb_y) * rand)**
 dimana,
 Posisi (: , 1) adalah inisialisasi posisi acak dari ukuran filter pada tiap *whale*.
 Posisi (: , 2) adalah inisialisasi posisi acak dari bus pada tiap *whale*.
9. Jika jumlah agen pencari yang digunakan adalah sebanyak lima, maka posisi acak dari ukuran filter X dapat bernilai $[1943,6 \ 1690,3 \ 3391,2 \ 3522,7 \ 8278]^T$ sedangkan posisi acak dari posisi kandidat penempatan filter pada bus Y dapat bernilai $[7 \ 9 \ 13 \ 2 \ 5]^T$.

10. Sehingga matriks posisi dari optimasi WOA pada inisialisasi awal adalah sebagai berikut:

$$Posisi^1 = \begin{bmatrix} 1943,6 & 7 \\ 1690,3 & 9 \\ 3391,2 & 13 \\ 3522,7 & 2 \\ 8278 & 5 \end{bmatrix}$$

Hasil simulasi dari optimasi WOA dengan inisialisasi posisi secara acak dapat dilihat pada Gambar 4-7. Pada grafik optimasi WOA Gambar 4-7 dibawah dapat dilihat bahwa dengan menggunakan inisial posisi acak algoritma WOA konvergen pada iterasi ke 43. Posisi bus terbaik adalah pada bus 5 dengan ukuran filter *single tuned* ke-5 sebesar 3152,78 KVAR. Data THD hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 4-9.

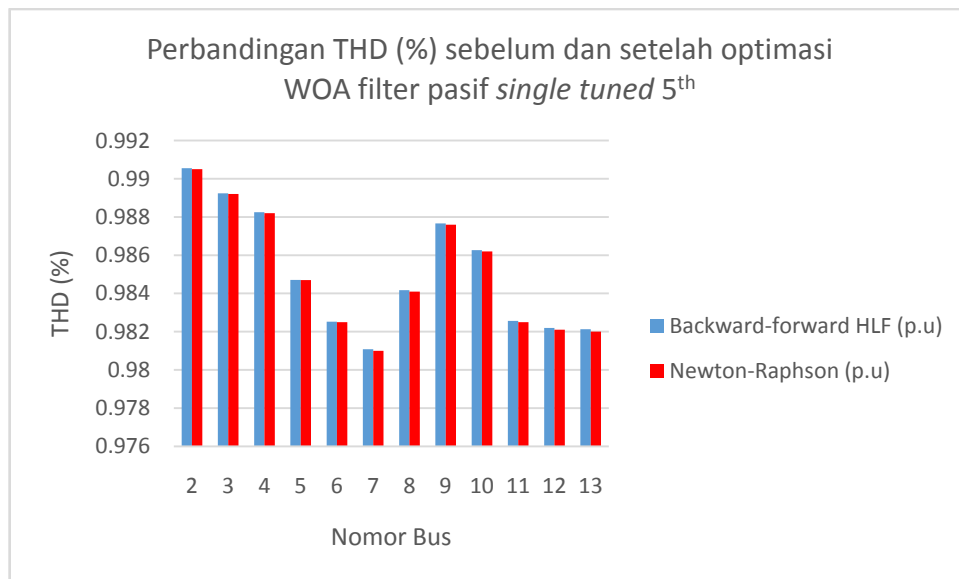


Gambar 4-7 Optimasi WOA dengan inisialisasi posisi secara acak ST filter 5th.

Dari Tabel 4-9 dibawah dapat dilihat bahwa THD rata-rata dari sistem menurun dari THD rata-rata awal sebesar 2,59 % menjadi 1,43 %. Selengkapnya dapat dilihat pada grafik perbandingan THD pada Gambar4-8.

Tabel 4-9 THD hasil HLF ST filter 5th menggunakan optimasi WOA.

Bus	Fundamental	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	THD(%)
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0,99451	0,00615	0,00232	0,00226	0,00127	0,00049	0,71267
3	0,99282	0,01106	0,00084	0,0009	0,00053	0,00021	1,12228
4	0,99184	0,01106	0,00084	0,00091	0,00054	0,00021	1,12346
5	0,99242	0,00041	0,01067	0,00852	0,00468	0,00174	1,46582
6	0,99025	0,00039	0,01068	0,00852	0,00468	0,00174	1,46941
7	0,98882	0,00035	0,01067	0,00852	0,00468	0,00174	1,47045
8	0,99189	0,00041	0,01068	0,00852	0,00468	0,00174	1,46684
9	0,99142	0,01727	0,00318	0,00154	0,00081	0,0003	1,78025
10	0,98984	0,02358	0,00623	0,00343	0,00179	0,00064	2,4957
11	0,99026	0,00177	0,00985	0,00801	0,00441	0,00165	1,37915
12	0,98988	0,00288	0,00928	0,00765	0,00422	0,00158	1,33001
13	0,98982	0,00228	0,00973	0,00795	0,00439	0,00164	1,37412

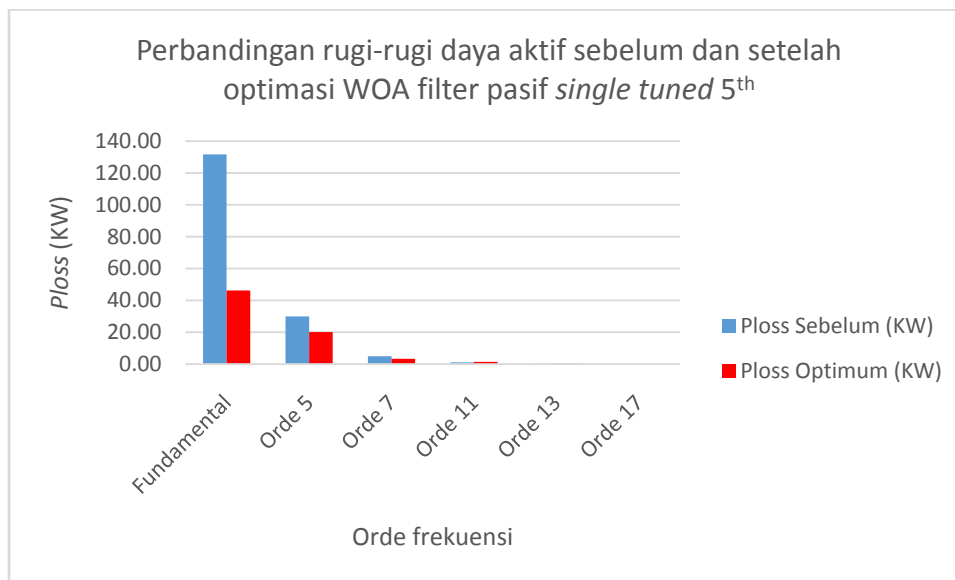


Gambar 4-8 Perbandingan THD (%) sebelum pemasangan filter dengan THD (%) hasil optimasi WOA ST filter 5th.

Dari Tabel 4-9 dan Gambar 4-8 dapat dilihat bahwa THD terbesar terdapat pada bus 9, akan tetapi hasil optimasi filter posisi optimum adalah pada bus 5. Hal ini dikarenakan fungsi objektif dari optimasi filter adalah untuk mendapatkan *Ploss* total (fundamental dan harmonik) pada RDS. Besar nilai *Ploss* sebelum dan sesudah optimasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4-10 *Ploss* sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th.

	<i>Ploss</i> Sebelum (KW)	<i>Ploss</i> Optimum (KW)
Fundamental	131,68	46,536
Orde 5	30,01	20,14
Orde 7	4,96	6,106
Orde 11	1,124	1,5377
Orde 13	0,2425	0,3353
Orde 17	0,0199	0,0275
Total	168,05	74,68

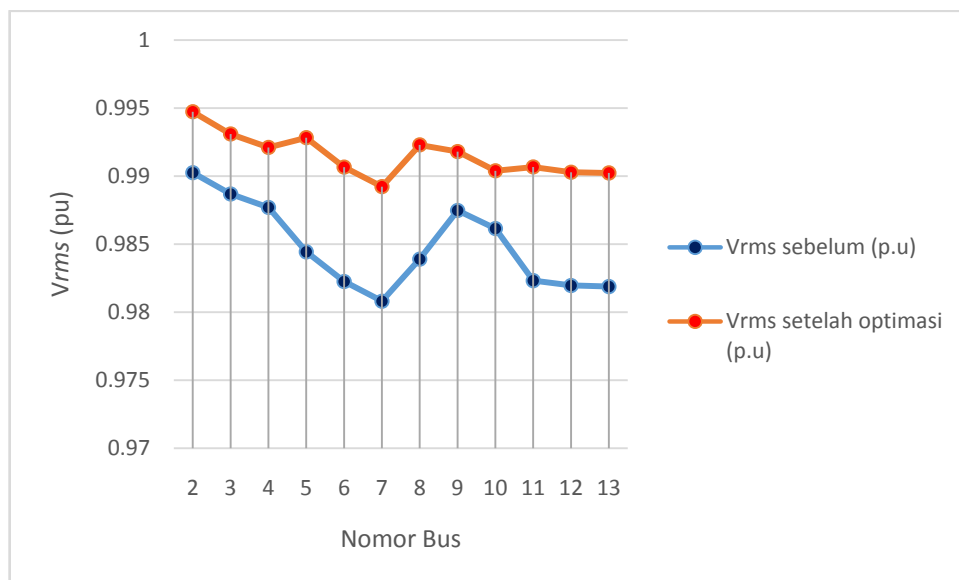


Gambar 4-9 Grafik perbandingan *Ploss* sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th.

Dapat dilihat pada Tabel 4-10 dan Gambar 4-9 diatas bahwa *Ploss* fundamental dan *Ploss* harmonik (khususnya pada Orde ke-5) sebelum dan setelah optimasi terlihat berkurang. Sehingga dapat dikatakan fungsi optimasi berjalan dengan baik. Perubahan besar tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA dapat dilihat pada tabel dan grafik dibawah:

Tabel 4-11 Perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi ST filter 5th.

Bus	Vrms sebelum (p.u)	Vrms setelah optimasi (p.u)
2	0,99025	0,99453
3	0,988687	0,99288
4	0,9877	0,9919
5	0,984437	0,99252
6	0,982254	0,99036
7	0,98081	0,98892
8	0,983901	0,99199
9	0,987473	0,99158
10	0,986145	0,99015
11	0,982318	0,99036
12	0,981961	0,98996
13	0,981886	0,98992



Gambar 4-10 Grafik perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th.

Pada Tabel 4-11 dan Gambar 4-10 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan atau kenaikan tegangan rms pada sistem. Besar tegangan rms dijaga pada $V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max}$. Dimana pada optimasi ini V_{\min} adalah 0,95 atau 95% dan V_{\max} adalah 1,05%. Perubahan tegangan rms yang terjadi pada sistem masih dalam *range* dari *constraint* tegangan.

4.2.2 Optimasi WOA filter *single tuned* 5th dan 7th

Pada optimasi WOA *single tuned* 5th dan 7th pada dasarnya hampir sama dengan optimasi WOA pada *single tuned* 5th diatas. Nilai inisial posisi bus akan diacak sebesar separuh dari jumlah total bus. Tahapan optimasi WOA untuk inialisasi posisi secara acak dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Parameter pencarian nilai optimum adalah ukuran dari filter (KVAR) pada *single tuned* 5th dan 7th serta posisi/penempatan filter pada jaringan. Sehingga dimensi pencarian dari WOA adalah 3 dimensi. Jika posisi awal dari dimensi adalah (X,Y,Z) , dimana X adalah ukuran filter 5th, Y adalah ukuran filter 7th, dan Z adalah posisi bus agen pencari i pada iterasi ke t , maka posisi optimum dari agen pencari i adalah (X^*,Y^*,Z^*) .
2. Batas atas (ub) dan batas bawah (lb) dari total ukuran filter ST 5th dan 7th adalah $0 \leq Q_{fil} \leq Q_{max}$, dimana $ub = Q_{max}$ dan $lb = 0$. Besar nilai lb adalah 0 karena dianggap *losses* terbesar adalah pada saat sebelum pemasangan filter ($Q_{fil} = 0$). Sedangkan Q_{max} adalah total daya reaktif yang diserap oleh sistem. Nilai Q_{max} didapatkan dari simulasi aliran daya dan aliran daya harmonisa pada saat sebelum pemasangan filter pada jaringan.
3. Sedangkan batas atas (ub) dan batas bawah (lb) dari posisi filter adalah $2 \leq Bus \leq 13$. Dimana 2 adalah nilai *integer* minimum dan 13 adalah nilai bus *integer* maksimum dari RDS.
4. Pada strategi ini jumlah *whale* yang digunakan adalah separuh dari jumlah total bus. Hal ini ditujukan untuk mempersempit pencarian posisi optimum.
5. Sedangkan jumlah iterasi yang digunakan adalah 1000.
6. Sehingga dari langkah 2 sampai dengan 5 diatas didapatkan:

$$ub = [Q_{max1} \ Q_{max2} \ 13];$$

$$lb = [0 \ 0 \ 2];$$

$$\text{Jumlah whale} = 5;$$

$$\text{Iterasi maksimum} = 1000;$$

$$\text{Dimensi pencarian} = 3;$$

7. Strategi inisialisasi posisi secara acak pada sub sub bab ini adalah mengacak nilai X , Y , dan Z (ukuran dan penempatan) sebagai berikut:

- $\text{Posisi}(:, 1) = \text{rand}(\text{posisi_i}) * (\text{ub_x} - \text{lb_x}) + \text{lb_x}$

- $\text{Posisi}(:, 2) = \text{rand}(\text{posisi_i}) * (\text{ub_x} - \text{lb_x}) + \text{lb_x}$

- $\text{Posisi}(:, 3) = \text{round}(\text{lb_y} + (\text{ub_y} - \text{lb_y}) * \text{rand})$

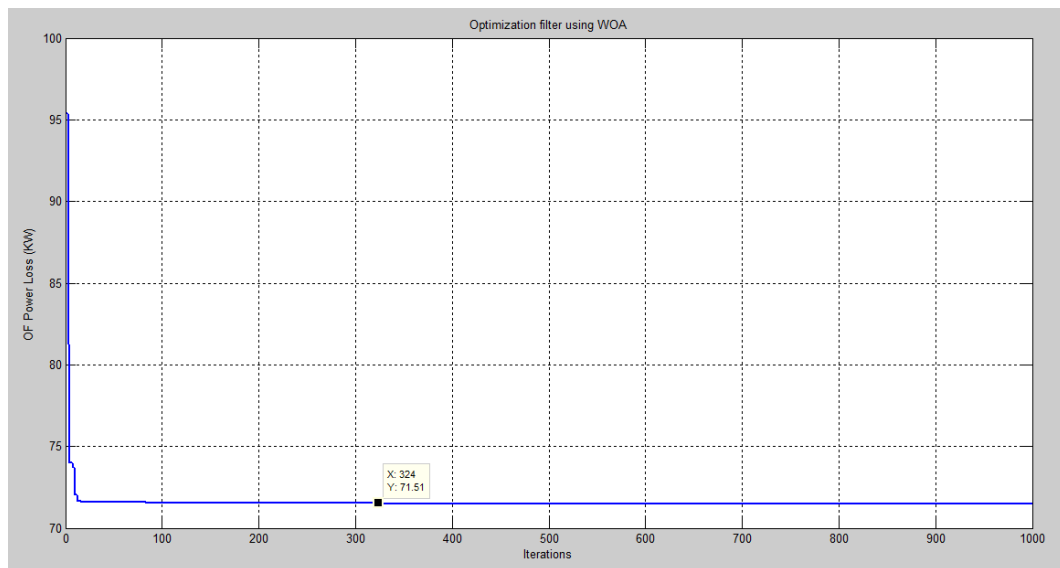
dimana,

$\text{Posisi}(:, 1)$ adalah inisialisasi posisi acak dari ukuran ST filter 5th pada tiap *whale*,

$\text{Posisi}(:, 2)$ adalah inisialisasi posisi acak dari ukuran ST filter 7th pada tiap *whale*, dan

$\text{Posisi}(:, 3)$ adalah inisialisasi posisi acak dari bus pada tiap *whale*.

Hasil simulasi dari optimasi WOA dengan inisialisasi posisi secara acak dapat dilihat pada grafik dibawah:



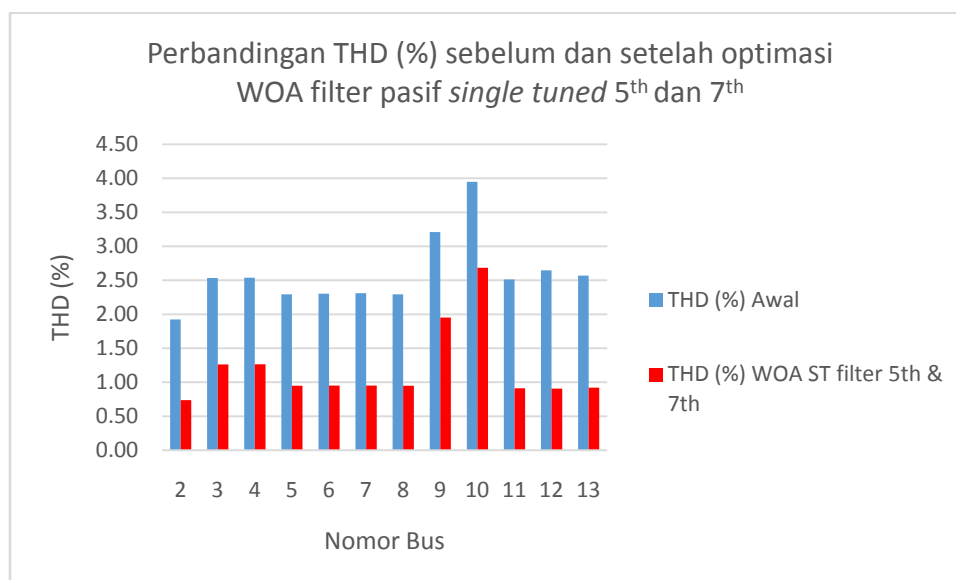
Gambar 4-11 Optimasi WOA pada inisialisasi posisi acak ST filter 5th dan 7th.

Pada grafik optimasi WOA diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan inisial posisi acak, algoritma WOA konvergen pada iterasi ke 324. Posisi bus terbaik adalah pada bus 5 dengan ukuran filter *single tuned* ke-5 sebesar 2083,99 KVAR dan *single tuned* ke-7 sebesar 1215 KVAR. Data % THD hasil optimasi dapat dilihat pada tabel dibawah:

Tabel 4-12 THD (%) hasil *backward-forward* HLF ST filter 5th dan 7th menggunakan optimasi WOA.

Bus	Fundamental	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	THD(%)
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0,9947	0,00611	0,00327	0,00199	0,00118	0,00047	0,73628
3	0,99302	0,01102	0,00593	0,00069	0,00044	0,00019	1,2627
4	0,99203	0,01102	0,00593	0,00069	0,00044	0,00019	1,264
5	0,99278	0,00067	0,00024	0,00805	0,00453	0,00172	0,94938
6	0,99062	0,00064	0,00023	0,00805	0,00454	0,00172	0,95161
7	0,98918	0,0006	0,00021	0,00805	0,00453	0,00172	0,9521
8	0,99225	0,00067	0,00024	0,00805	0,00453	0,00172	0,95003
9	0,99162	0,01721	0,00865	0,0017	0,00083	0,00029	1,95165
10	0,99004	0,02351	0,01169	0,00364	0,00184	0,00064	2,68501
11	0,99063	0,0018	0,0009	0,00753	0,00426	0,00162	0,91175
12	0,99024	0,00284	0,00142	0,00717	0,00407	0,00156	0,90619
13	0,99019	0,00233	0,00114	0,00747	0,00423	0,00161	0,92029

Dari tabel 4-9 diatas dapat dilihat bahwa THD rata-rata dari sistem menurun dari THD rata-rata awal sebesar 2,59 % dan setelah dilakukan optimasi pemasangan ST filter 5th dan 7th menjadi 1,2%. Selengkapnya dapat dilihat pada grafik perbandingan THD dibawah:

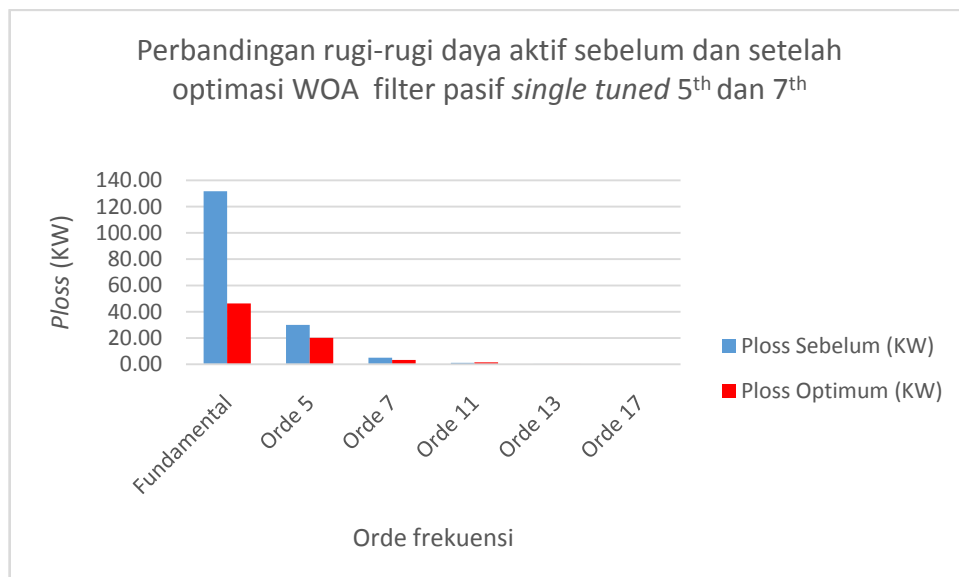


Gambar 4-12 Perbandingan THD (%) sebelum pemasangan filter dan setelah optimasi WOA ST filter 5th dan 7th.

Dari Tabel 4-12 dan Gambar 4-12 diatas dapat dilihat bahwa THD terbesar terdapat pada bus 9 akan tetapi hasil optimasi filter posisi optimum adalah pada bus 5. Hal ini dikarenakan fungsi objektif dari optimasi filter adalah untuk mendapatkan *Ploss* total (fundamental dan harmonik) pada RDS. Besar nilai *Ploss* sebelum dan sesudah optimasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4-13 *Ploss* sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th dan 7th.

	<i>Ploss</i> Sebelum (KW)	<i>Ploss</i> Optimum (KW)
Fundamental	131,68	46,28
Orde 5	30,01	20,13
Orde 7	4,96	3,334
Orde 11	1,124	1,463
Orde 13	0,2425	0,3253
Orde 17	0,0199	0,0271
Total	168,05	71,66



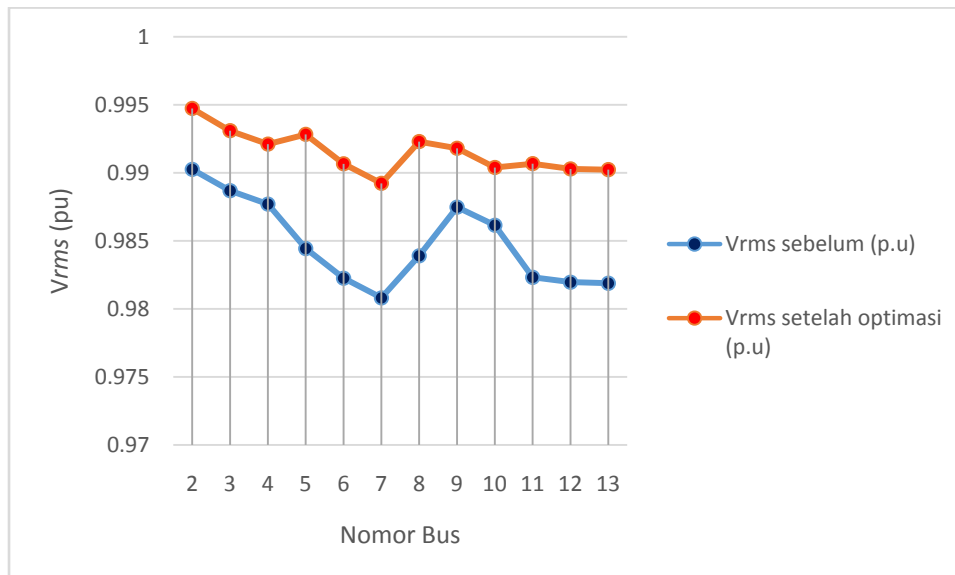
Gambar 4-13 Grafik perbandingan *Ploss* sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th dan 7th.

Dapat dilihat pada Tabel 4-13 dan Gambar 4-13 diatas bahwa *Ploss* fundamental dan *Ploss* harmonik (khususnya pada Orde ke-5 dan ke-7) sebelum-

dan setelah optimasi terlihat berkurang. Sehingga dapat dikatakan fungsi optimasi berjalan dengan baik. Perubahan besar tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA dapat dilihat pada tabel dan grafik dibawah.

Tabel 4-14 Perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi ST filter 5th dan 7th.

Bus	Vrms sebelum (p.u)	Vrms setelah optimasi (p.u)
2	0,99025	0,994731
3	0,988687	0,993094
4	0,9877	0,992111
5	0,984437	0,992828
6	0,982254	0,990662
7	0,98081	0,989229
8	0,983901	0,992296
9	0,987473	0,991807
10	0,986145	0,990393
11	0,982318	0,990672
12	0,981961	0,990284
13	0,981886	0,990232



Gambar 4-14 Grafik perubahan tegangan rms sebelum dan setelah optimasi WOA ST filter 5th dan 7th.

Pada Tabel 4-14 dan Gambar 4-14 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan atau kenaikan tegangan rms pada sistem. Besar tegangan rms dijaga pada $V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max}$. Dimana pada optimasi ini V_{\min} adalah 0,95 atau 95% dan V_{\max} adalah 1,05%. Perubahan tegangan rms yang terjadi pada sistem masih dalam *range* dari *constraint* tegangan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan percobaan dan analisa dari hasil simulasi, maka diperoleh kesimpulan antara lain sebagai berikut :

1. Analisa daya menggunakan metode *backward-forward sweep* dengan mempertimbangkan adanya filter terbukti cukup handal yaitu memiliki rata-rata prosentase *error* dibawah 5% atau 0,05. Analisa daya sebelum pemasangan filter didapatkan prosentase perhitungan tegangan fundamental *error* rata-rata sebesar 0,01%. Prosentase perbedaan perhitungan rugi-rugi daya antara perhitungan *backward-forward sweep* dengan *Newton-Raphson* sebesar 0,17% atau 0,0017. Setelah pemasangan filter didapatkan prosentase perhitungan tegangan fundamental *error* rata-rata sebesar 0,13%. Sedangkan prosentase perbedaan perhitungan rugi-rugi daya fundamental antara perhitungan *backward-forward sweep* dengan metode *Newton-Raphson* sebesar 0,02% atau 0,0002.
2. Aliran daya harmonisa/*harmonic load flow* (HLF) dengan mempertimbangkan adanya filter juga terbukti handal, yaitu juga memiliki rata-rata prosentase *error* dibawah 5% atau 0,05. Sebelum pemasangan filter didapatkan prosentase perhitungan THD 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 3,03% atau 0,0303. Prosentase perhitungan tegangan rms 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 0,01% atau 0,0001. Setelah pemasangan filter didapatkan prosentase perhitungan THD 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 3 % atau 0,03. Sedangkan prosentase perhitungan tegangan rms 5 orde harmonisa *error* rata-rata sebesar 0,01% atau 0,0001.
3. Besar THD rata-rata sebelum pemasangan filter sebesar 2,59 %. Setelah dilakukan optimasi filter *single-tuned* 5th menjadi 1,43 % dan setelah dilakukan lagi optimasi pemasangan filter *single-tuned* 5th dan 7th yang dipasang *parallel* menjadi 1,2 %. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi

penurunan THD *average* pada optimasi pemasangan filter. Penurunan yang terjadi tidak begitu tajam dikarenakan antara lain selisih arus injeksi antara harmonisa ke-5 dan ke-7 sangat besar sehingga penurunan % THD *average* tidak begitu tajam, serta fungsi objektif optimasi adalah untuk mendapatkan nilai minimum *Ploss* bukan minimum %THD *average*.

4. Fungsi objektif dari optimasi WOA telah tercapai. Terjadi penurunan *Ploss* total dari sebelum optimasi sebesar 168,05 KW menjadi 74,68 KW pada optimasi pemasangan filter *single-tuned* 5th, dan turun menjadi 71,66 KW pada optimasi pemasangan filter *single-tuned* 5th dan 7th yang dipasang *parallel*. Terdapat selisih yang kecil yaitu sekitar 3 KW antara optimasi filter *single-tuned* 5th dengan optimasi *parallel* filter *single-tuned* 5th dan 7th. Hal ini dapat disebabkan karena arus injeksi antara 7 sangat kecil bila dibandingkan dengan arus injeksi harmonisa orde 5. Sehingga pemasangan *parallel* filter *single-tuned* 5th dan 7th tidak begitu efektif untuk optimasi fungsi objektif.
5. Pada optimasi pemasangan filter *single-tuned* 5th WOA konvergen pada iterasi ke 43, sedangkan pada optimasi filter *single-tuned* 5th dan 7th yang dipasang *parallel* konvergen pada iterasi ke 324. Hal ini menunjukkan kecepatan optimasi WOA sangat tergantung oleh dimensi pencarian.

5.2 Saran

1. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambahkan fungsi objektif seperti total biaya yang juga memperhitungkan biaya dari adanya rugi-rugi daya dan biaya dari desain filter itu sendiri.
2. Untuk optimasi yang lain dapat menggunakan algoritma WOA dengan mengkombinasikan dengan algoritma yang lain untuk mendapatkan hasil yang lebih cepat terutama untuk optimasi pada dimensi pencarian yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Teng, J. and Chang, C, "Backward/Forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, no.3, pp. 1665-1672, 2007.
- Teng, J. H., "Network-topology-based three-phase load flow for distribution systems," Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A), vol.24, no.4, pp. 259-264, 2000.
- Eajal, A.A.; El-Hawary, M.E., "Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution Systems With Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.25, no.3, pp.1734, 1741, July 2010.
- IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, NY: IEEE, 1993.
- Chang, G.W.; Shou-Yung Chu; Hung-Lu Wang, "Sensitivity-based approach for passive harmonic filter planning in a power system," Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE , vol.2, pp.937, 940 vol.2, 2002.
- Chang, G.W.; Chu, S.Y.; Wang, H.L., "A new approach for placement of single-tuned passive harmonic filters in a power system," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE , vol.2, pp.814,817 vol.2, 25-25 July 2002.
- Seyedali Mirjalili and Andrew Lewis, "The Whale Optimization Algorithm" Advances in Engineering Software 95, 51–67, 2016.
- F.M. Alhaddad, M. E El-Hawary "Optimal Filter Placement and Sizing using Ant Colony Optimization in Electrical DistributionSystem," 2014 Electrical Power and Energy Conference, pp. 128-133, 2014.
- Ram BS, Forrest JAC and Swift GW (1988). "Effect of harmonics on converter transformer load losses," IEEE Transactions on Power Delivery 3(3) 1059-1066.
- D.B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Optimal siting of capacitors in radial distributionnetwork using Whale Optimization Algorithm, " Alexandria Engineering Journal, 2016, in press.

- C. Sankaran, "Power Quality". United States of America: CRC, 2002.
- Fitriana Suhartati, Dimas Fajar U. P., Ontoseno Penangsang, and Adi Soeprijanto, "Capacitor Placement and Sizing in Distorted Distribution Systems Using Simplified Direct Search Algorithm," *Journal of Clean Energy Technologies* vol. 2, no. 4, pp. 317-321, 2014.
- A.I. Maswood, M.H. Haque, "Harmonics sources effects and mitigation techniques", *Second International Conference on Electrical and Computer Engineering, ICECE*, Dhaka, Bangladesh, 2002, pp. 26-28.
- H. Akagi, "Modern active filters and traditional passive filters", *Bull. Pol. Acad. Sci., Tech. Sci.* 54 (3) (2006) 255-269.
- R. Dugan, et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2004.
- Mohammad Mohammadi, "Bacterial foraging optimization and adaptive version for economically optimum sitting, sizing and harmonic tuning orders setting of LC harmonic passive power filters in radial distribution systems with linear and nonlinear loads", *Applied Soft Computing* 29 (2015) 345-356, 2015.
- Soedibyo, Sjamsjul Anam, "Desain filter pasif pada sistem kelistrikan industri guna mengurangi distorsi harmonisa", *JAVA Journal of Electrical and Electronics Engineering* Volume 10, Number 2, 2012.

LAMPIRAN

Matriks BIBC (Branch Injection Bus Current)

Tabel A - 1 Matriks BIBC

1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriks BCBV (Branch Current to Bus Voltage)

Tabel A - 2 Matriks BCBV (kolom 1-4)

1	2	3	4
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	0
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0030 + 0.0012i$	0	0
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0030 + 0.0012i$	$0.0046 + 0.0013i$	0
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	0
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	0
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$
$0.0033 + 0.0013i$	0	0	$0.0042 + 0.0012i$

Tabel A - 3 Matriks BCBV (kolom 5-6)

5	6	7	8
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
$0.0042 + 0.0012i$	0	0	0
$0.0042 + 0.0012i$	$0.0087 + 0.0015i$	0	0
0	0	$0.0058 + 0.0010i$	0
0	0	0	$0.0087 + 0.0015i$
0	0	0	$0.0087 + 0.0015i$
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Tabel A - 4 Matriks BCBV (kolom 1-4)

9	10	11	12
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
$0.0058 + 0.0010i$	0	0	0
0	$0.0036 + 0.0006i$	0	0
0	$0.0036 + 0.0006i$	$0.0029 + 0.0005i$	0
0	$0.0036 + 0.0006i$	0	$0.0044 + 0.0008i$

Matriks DLF

Tabel A - 5 Matriks DLF (kolom 1-4)

1	2	3	4
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0062 + 0.0026i$	$0.0062 + 0.0026i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0062 + 0.0026i$	$0.0108 + 0.0038i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0074 + 0.0025i$

Tabel A - 6 Matriks DLF (kolom 5-8)

5	6	7	8
$0.0033 + 0.0013i$	$0.033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0116 + 0.0037i$	$0.0116 + 0.0037i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0116 + 0.0037i$	$0.0203 + 0.0052i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0133 + 0.0035i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0120 + 0.0028i$
$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0033 + 0.0013i$	$0.0120 + 0.0028i$
$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$
$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0074 + 0.0025i$	$0.0033 + 0.0013i$

Tabel A - 7 Matriks DLF (kolom 9-12)

9	10	11	12
0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i
0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i
0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i
0.0033 + 0.0013i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i
0.0033 + 0.0013i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i
0.0033 + 0.0013i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i
0.0033 + 0.0013i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i	0.0074 + 0.0025i
0.0120 + 0.0028i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i
0.0178 + 0.0038i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i	0.0033 + 0.0013i
0.0033 + 0.0013i	0.0111 + 0.0031i	0.0111 + 0.0031i	0.0111 + 0.0031i
0.0033 + 0.0013i	0.0111 + 0.0031i	0.0140 + 0.0036i	0.0111 + 0.0031i
0.0033 + 0.0013i	0.0111 + 0.0031i	0.0111 + 0.0031i	0.0154 + 0.0039i

Matriks HA

Tabel A - 8 Matriks HA (kolom 1-6)

1	2	3	4	5	6
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0062 + 0.0434i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0062 + 0.0434i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0120 + 0.0482i	0.0120 + 0.0482i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0120 + 0.0482i	0.0178 + 0.0652i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0111 + 0.0534i	0.0111 + 0.0534i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0140 + 0.0619i	0.0111 + 0.0534i
0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0111 + 0.0534i	0.0154 + 0.0661i

Tabel A - 9 Matriks HA (kolom 7-12)

7	8	9	10	11	12
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0062 + 0.0434i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0062 + 0.0434i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0062 + 0.0434i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0108 + 0.0652i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0116 + 0.0623i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0116 + 0.0623i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0120 + 0.0482i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0120 + 0.0482i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i

Tabel A - 10 Matriks HA (kolom 13-18)

13	14	15	16	17	18
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i	0.0116 + 0.0623i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i	0.0203 + 0.0878i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0133 + 0.0595i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0074 + 0.0425i	0.0074 + 0.0425i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0120 + 0.0482i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i	0.0178 + 0.0652i	0.0033 + 0.0227i	0.0033 + 0.0227i
0.0074 + 0.0425i	0.0111 + 0.0534i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0111 + 0.0534i	0.0111 + 0.0534i
0.0074 + 0.0425i	0.0111 + 0.0534i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0140 + 0.0619i	0.0111 + 0.0534i
0.0074 + 0.0425i	0.0111 + 0.0534i	0.0074 + 0.0425i	0.0033 + 0.0227i	0.0111 + 0.0534i	0.0154 + 0.0661i

Matriks A

Tabel A - 11 Matriks A (kolom 1-9)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabel A - 12 Matriks A (kolom 10-18)

10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1

BIOGRAFI PENULIS



Aswin Rosyadi dilahirkan pada tanggal 10 April 1986 di kota Pelaihari-Kalimantan Selatan, merupakan anak pertama dari pasangan Drs. Asmuni dan Almh. Mustaidah S.pd. Riwayat pendidikan penulis adalah MIM 01 Watukebo Ambulu Jember (1992 – 1998), SMPM 09 Watukebo Ambulu Jember (1998 – 2001), SMAN 1 Ambulu Jember (2001 – 2004) dengan penjurusan Ilmu Pengetahuan Alam, dan D4 Teknik Elektro Industri – Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (2005 – 2009).

Penulis sempat vakum selama 3 (tiga) tahun dikarenakan bekerja sebagai Engineer di PT. Jayamas Medica Industri (2009 – 2010), dan Project Engineer di PT Lintech Duta Pratama (2010 – 2011). Pada tahun 2012 penulis memutuskan untuk melanjutkan program Magister di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga yang berfokus pada simulasi dan optimasi sistem. Akhirnya pada tahun 2017 penulis berhasil menyelesaikan studi meskipun pada pertengahan studi, tahun 2013 sampai dengan sekarang (2017), penulis bekerja sebagai programmer di Dinas Cipta Karya dan Tata Ruang Pemerintah Kota Surabaya. Penulis dapat dihubungi di alamat email: aswin.rosyadi@gmail.com.